



Projecte Fi de Carrera

Enginyeria de Telecomunicació

Disseny i caracterització d'estructures RF amb printed electronics per a RFID

Xavier Elias Martínez Domínguez

Director: Eloi Ramon Garcia

Departament d'electrònica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE)
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

Setembre 2009



El sotasignant, Eloi Ramon Garcia, Professor de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el projecte presentat en aquesta memòria de Projecte Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne Xavier Elias Martínez Domínguez.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 7 de setembre de 2009.

Signatura: Eloi Ramon Garcia

**A tots els que m'han ajudat a recórrer
aquest llarg camí. Als meus pares i a la
Meri per estar al meu costat.**

ÍNDEX

INTRODUCCIÓ	1
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ A PRINTED ELECTRONICS	2
1.1 Què és Printed Electronics?.....	2
1.1.1 Avantatges.....	2
1.2 Sistemes d'impressió.....	4
1.2.1 Flexografia	6
1.2.2 Gravat	6
1.2.3 Òfset	7
1.2.4 Serigrafia	8
1.2.5 Injecció de tinta.....	9
1.2.6 Altres.....	12
1.3 Característiques de les tintes i materials.....	12
CAPÍTOL 2. DISSENY I CARACTERITZACIÓ D'ELEMENTS BÀSICS AMB PRINTED ELECTRONICS	15
2.1 Descripció d'equips i caracterització de materials	15
2.1.1 Impressora de materials Dimatix.....	15
2.1.2 Tintes i substrats	17
2.1.3 Influència del temps de curat en la resistivitat.....	18
2.1.4 Mesura conductivitat de la tinta U5603	19
2.2 Disseny i caracterització de resistències	22
2.3 Disseny i caracterització de condensadors.....	26
2.3.1 Condensador de plaques paral·leles	26
2.3.2 Condensador interdigital.....	30
2.3 Disseny i caracterització d'inductàncies	31
CAPÍTOL 3. DISSENY D'ANTENA PER A TAG RFID	35
3.1 Sistema RFID.....	36
3.1.1 Etiqueta o tag	37
3.1.2 Lector.....	39
3.1.3 Comunicació tag-lector.....	40
3.1.4 Hibridació del tag	42
3.2 Antena per 125 kHz.	44
3.3 Antena per 13,56 MHz.	45
3.3.1 Simulacions de l'antena.....	46
3.3.2 Mesures del prototip	47
3.4 Antena per 860-960 MHz.	49
3.4.1 Simulacions antena TI.....	50

CONCLUSIONS	55
BIBLIOGRAFIA	56

INTRODUCCIÓ

Cometre un error sempre marca un abans i un després en una persona però no sempre t'obre el camí cap al un premi Nobel de química. L'any 1976 un malentès entre el japonès Hideki Shirakawa i un científic visitant va fer que el segon produís un polímer amb una quantitat mil cops més elevada de catalitzador del normal. Això va provocar la síntesi del primer polímer conductor. Posteriorment juntament amb el neozelandès Alan G. MacDiarmid i el nord americà Alan Heeger investigar sobre aquests polímers el que els va portar a ser guardonats amb el Nobel l'any 2000.

Aquells primers polímers conductors van donar el tret de sortida de la cursa de *printed electronics*. El terme fa referència a la utilització de tècniques d'impressió convencional de la indústria gràfica per a imprimir circuits i dispositius electrònics. Per a fer-ho es fan servir tintes conductores basades en polímers o en nanopartícules de plata, resistives, dielèctriques o en polímers semiconductors. Això ha generat molt interès en la indústria per l'ús de substrats de baix cost com paper i plàstic els quals un cop impresos són flexibles i molt fins.

En aquest treball es volen dissenyar i fabricar diferents dispositius amb la tecnologia d'injecció de tinta que es disposa al laboratori de CEPHIS per comprovar si els resultats de les eines de simulació electromagnètica són propers a les mesures dels prototips.

En el primer capítol es farà una introducció a *printed electronics* descrivint amb més detall el concepte, els diferents sistemes d'impressió que es poden utilitzar i els materials en que es basen les tintes i els substrats.

Les característiques de les estructures impreses poden ser diferents al que s'extreu de les simulacions. Per això en el segon capítol es caracteritzaran les tintes que disposem i es faran amb elles dispositius electrònics bàsics per veure les seves característiques i comparar-les amb les simulacions.

En sistemes logístics ja fa temps que s'està fent servir RFID per identificar objectes de forma ràpida i senzilla. Fer etiquetes RFID impreses amb un preu molt baix revolucionaria en molts aspectes la vida quotidiana, per exemple permetria etiquetar amb etiquetes per radiofreqüència tots els objectes dels supermercats i no com en l'actualitat que només és fa amb els més cars degut al preu de les etiquetes.

Per això en la tercera part s'introdueix RFID i la seva relació amb *printed electronics*. Al llarg del treball s'han dissenyat i imprès antenes per RFID a les diferents bandes en les que treballa aquest sistema per veure quines prestacions aconseguim amb la finalitat d'hibridar l'antena amb un xips RFID.

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ A PRINTED ELECTRONICS

En aquest primer capítol s'explicarà el que entenem sobre *printed electronics*, ho compararem vers altres tecnologies i mostrarem les diferents tècniques d'impressió existents en l'actualitat.

1.1 Què és Printed Electronics?

Per contestar de forma breu aquesta pregunta el que es pot dir és que el concepte de *printed electronics* fa referència a la fabricació de components i circuits electrònics amb tècniques d'impressió convencionals.

Des de fa uns anys una de les tendències en el món de l'electrònica és la d'imprimir els circuits sobre diferents substrats amb capes de tintes conductores, dielèctriques, resistives i semiconductores. L'objectiu final seria el de poder realitzar qualsevol tipus de sistema electrònic sobre substrats tan diversos com paper, plàstics o teixits, per exemple. Aquests substrats són flexibles per si i de baix cost, que són algunes dels avantatges que veurem més endavant..

De moment les resolucions en les que es treballa són de l'ordre de micròmetres degut a que les tintes i la tecnologia estan en procés de millora i s'està lluny encara dels nivells d'integració de l'electrònica convencional. Per aquest motiu és pot dir que encara no són competidors directes degut a la limitació en prestacions i d'integració però hi ha camps d'aplicació en els quals això no és crític on s'està apostant per *printed electronics*. Actualment es fabriquen pantalles OLED per a telèfons mòbils o ordinadors portàtils, s'està treballant en aconseguir etiquetes RFID totalment impreses, bateries impreses que serien fines i flexibles, sensors, grans displays, plaques fotovoltaïques flexibles o simplement per fer circuits híbrids amb interconnexions impreses i soldant dispositius convencionals.

Degut a que la mida del substrat no està limitada a l'àrea d'una obla pel material del mateix també se l'anomena *large area electronics*. També se'n diu *organic electronics* per que les tintes que s'utilitzen són amb polímers basats en carboni. Altres noms que rep són plàstic o flexible electronics que intenten donar una idea del mateix però no sempre és cert que s'utilitzen tècniques d'impressió convencionals.

1.1.1 Avantatges

En aquest subapartat mostrarem els avantatges i desavantatges que té o es preveu que tingui *printed electronics*.

Com sabem en el món de la indústria electrònica un dels punts més importants que s'analitza d'una tecnologia és el cost i concretament *printed electronics* s'espera que permeti reduir costos respecte a l'electrònica convencional. En aquest sentit quan es parla d'on es vol arribar per tal de baixar els costos de producció és al procés de fabricació *reel-to-reel* o *roll-to-roll*.

El concepte bàsic de processament *reel-to-reel* és tindre una bobina de substrat a l'entrada de la nostra línia de fabricació alimentant-la i a la sortida tenim una altra bobina on anem enrotllant el substrat amb tota l'electrònica ja impresa (**Fig. 1.1**). Això representa abaratir costos en certs punts de la producció que es comenten a continuació.



Fig. 1.1 Producció *reel-to-reel*

En el nostre cas a l'utilitzar tècniques d'impressió el procés seria additiu i no subtractiu com és habitualment. S'anirien afegint capes de les diferents tintes fins aconseguir els dispositius o circuits dissenyats i no és farien servir les tècniques convencionals de fotolitografia i atacat per fabricar-los (**Fig. 1.2**). Això s'espera que sigui un gran avantatge ja que es redueix la complexitat del procés degut a que caldria fer menys passos cosa que redueix el nombre de màquines o eines necessàries a la cadena. Com la impressió és fa en zones concretes del substrat de forma selectiva també permetria estalviar en costos dels materials de fabricació, gestió i tractament de residus com els que es produeixen per l'atacat químic.

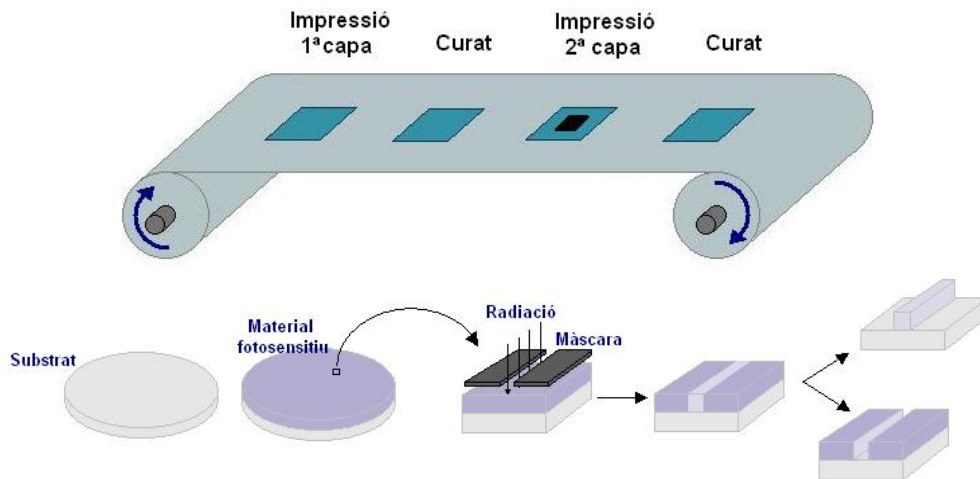


Fig. 1.2 Procés *reel-to-reel* additiu VS convencional.

Llavors si ajuntem això amb el processat *reel-to-reel* obtenim que s'abaratiria la manipulació dels substrats i seria més senzilla l'automatització de les fàbriques gràcies a treballar amb rotlles o fulls de substrats i no amb oblies. Tenint en compte costos dels materials, substrats, estimacions d'inversió de capital i de capacitat de producció, s'obté que *printed electronics* seria viable econòmicament vers l'electrònica convencional quan el que ens limita és l'àrea unitària i no la densitat de funcions per àrea. En aquests casos s'espera tenir una millora en costos de més de 10X arribant fins a 200X depenent del tipus de flux del procés (veure [1]).

Deixant de banda els costos de producció també ens permetria fer circuits on no ens limita la mida de l'oblia ja que es podrien utilitzar sistemes d'impressió de gran format i integrar en un mateix procés electrònica en altres medis impresos com cartells publicitaris o revistes per exemple.

El gran desavantatge, com s'ha dit anteriorment, el produeix el que la tecnologia no sigui madura, això provoca que no es trobin tintes o maquinària que ens permetin arribar a fer circuits amb resolucions petites i de forma industrial fora del laboratori.

1.2 Sistemes d'impressió

En el món de les arts gràfiques és fan servir varis sistemes d'impressió que estan molt consolidats i estudiats ja que es fan servir des de fa molts anys, ara aquests s'estan adaptant per a fer-los servir en l'electrònica impresa. Cadascun d'aquests sistemes presenta pros i contres que s'han de tindre en compte per escollir el que s'adapti millor als nostres requeriments. Els més representatius són la injecció de tinta, la serigrafia, el gravat, la flexografia i l'òfset degut a que són els que presenten millors perspectives de futur en el nostre camp d'interès.

D'entrada es divideixen en dos grans grups analògiques i digitals. Aquesta divisió la marca si en els sistemes que s'imprimeix es fa a partir d'un motlle com en els analògics o si el patró es realitza directament des d'un ordinador controlant la impressora, els digitals. A continuació podem veure a grans trets les diferències entre les diferents tecnologies.

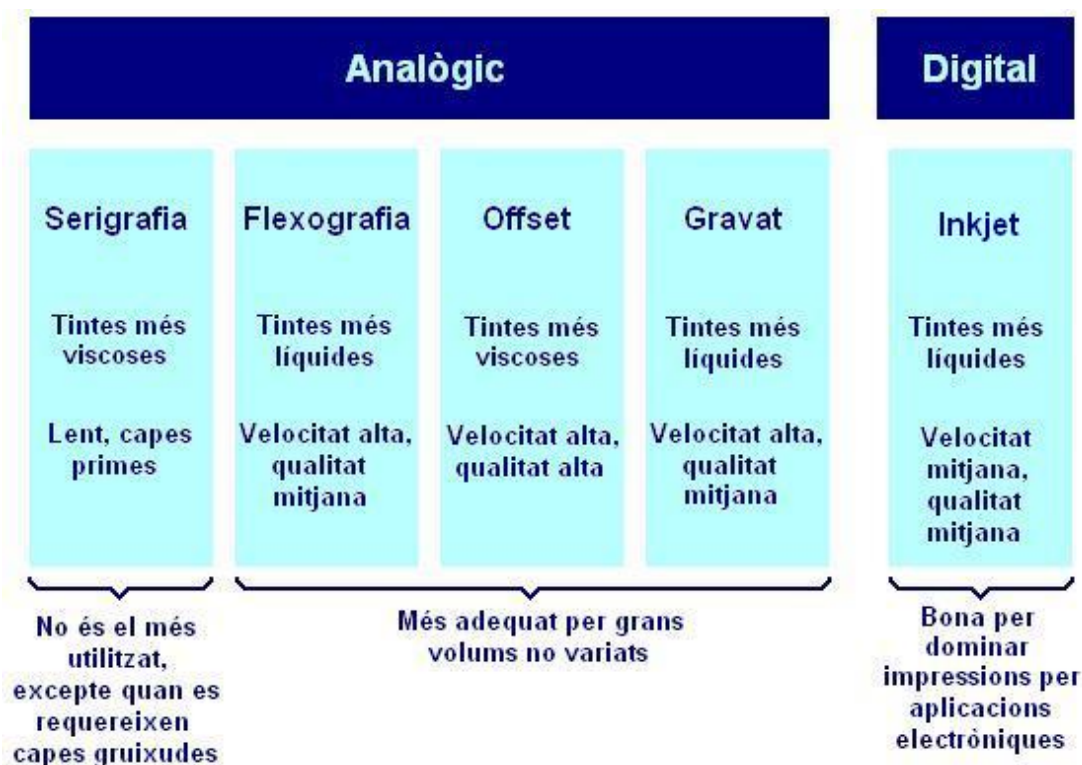


Fig. 1.3 Diferència entre els diferents sistemes d'impressió

En quant a la velocitat d'impressió, resolució, gruixos i viscositat necessària per a les tintes podem veure a la següent taula entre quins valors es mouen els paràmetres depenent del sistema utilitzat.

Taula 1.1 Característiques dels sistemes d'impressió (Font: OE-A Roadmap 2008)

Mètode d'impressió	Velocitat(m ² /s)	Resolució(μm)	Gruix (μm)	Viscositat(Pas)
Flexografia	10	20-50	0,5 - 2	0,05 - 0,5
Gravat	10	20-50	0,5 - 2	0,05 - 0,2
Offset	20	15	0,5 - 2	30 - 100
Serigrafia	<10	80-100	5 - 25	0,5 - 50
Inkjet	0,1 - 1	20	0,1 - 0,5	0,002 - 0,025

Anem a explicar breument els sistemes més utilitzats aprofundint una mica més en injecció de tinta ja que és el que s'utilitzarà principalment en el projecte.

1.2.1 Flexografia

La flexografia és un mètode comú d'impressió en massa basat en l'estampació. En aquesta tècnica la imatge a ser transferida està definida com un àrea elevada elàstica al voltant d'un rodets que normalment, però no sempre, s'entinta per transferència des d'un rodets d'entintat que s'anomena rodets anilox tal i com podem veure a la figura següent (**Fig. 1.4**).

Passant el substrat que volem imprimir entre el rodets d'impressió i un cilindre la tinta de les àrees elevades serà transferida al substrat. Tot i que amb flexografia s'aconsegueixen velocitats molt elevades i amb resolucions inclús per sota dels 20 μm . Un dels problemes que té és que la tinta s'escampa formant aurèoles al voltant dels costats degut a la pressió del motlle elàstic cosa que dificulta el poder fer capes amb gruixos uniformes.

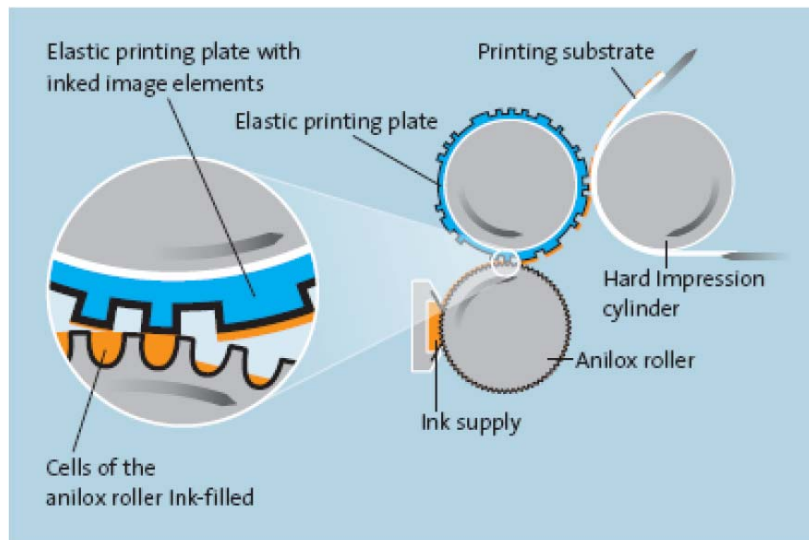


Fig. 1.4. Procés d'impressió flexogràfica. Font: VDMA

1.2.2 Gravat

En gravat (*gravure*) la imatge a transmetre, al contrari que en flexografia, la formen petites "copes" gravades en el cilindre d'impressió on es diposita la tinta. En aquest procés tot el cilindre s'entinta, però amb una espàtula es retira l'excés de tinta de mode que només les copes continguin tinta. El substrat passa entre dos rodets i l'elevada pressió exercida fa que la tinta de les copes sigui transferida al substrat. A continuació podem veure'n un esquema.

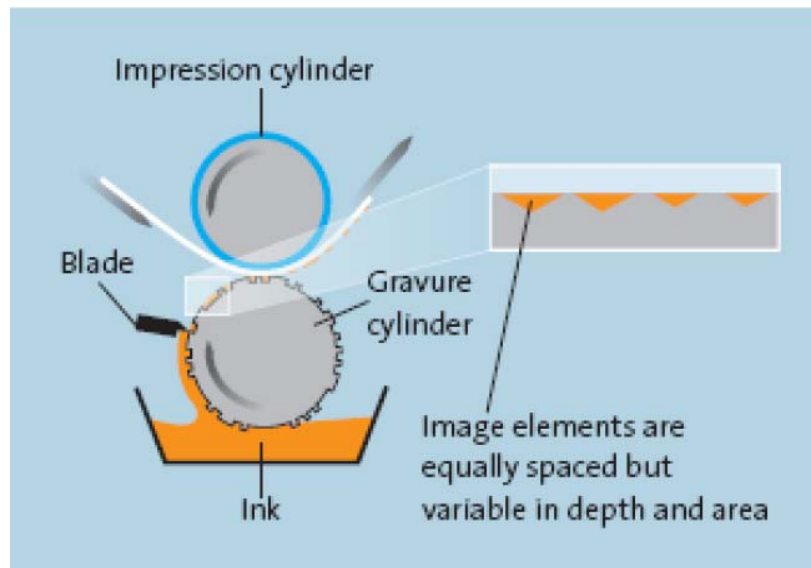


Fig. 1.5 Procés d'impressió per gravat. Font: VDMA

Controlant la mida de les copes i la densitat és possible transferir diferents quantitats de material aspecte interessant de cara a tenir gruixos diferents a varies parts del substrat. Degut al que s'està avançant en gravat assistit per làser i gravat directe làser del cilindre d'impressió les possibilitats de controlar la transferència de material i aconseguir resolucions més altes han crescut.

1.2.3 Òfset

L'òfset (*offset*) és un dels mètodes d'impressió més comú per a impressions gràfiques de grans volums, per exemple les grans màquines full a full poden imprimir fins a 20.000 fulls o el que és el mateix més de 15.000 m² per hora i les roll-to-roll encara més. Per tant si fos possible produir electrònica amb aquesta tècnica es podria augmentar el volum de producció

El terme òfset fa referència a que la imatge no està definida al cilindre que transfereix la tinta al substrat si no que del cilindre amb la imatge, que és el que s'entinta, es transfereix la tinta a un segon cilindre anomenat d'òfset i d'aquest al substrat com s'entendrà millor a la **Fig. 1.6**. Això permet que no es degradi tant el cilindre amb la plantilla que sol ser d'alumini ja que el d'òfset és més tou permetent imprimir a sobre de més varietat de materials.

El principal inconvenient que presenta és que precisa d'una elevada viscositat inicial de les tintes necessària per a aquest sistema. Per aconseguir això s'afegeixen aglutinants a la tinta que poden fer malbé la funcionalitat dels semiconductors o afegir fugues i massa dissipació als dielèctrics. Això fa que a pesar de tenir una resolució bona i velocitat elevada no hi hagi tanta activitat com en gravat o flexografia.

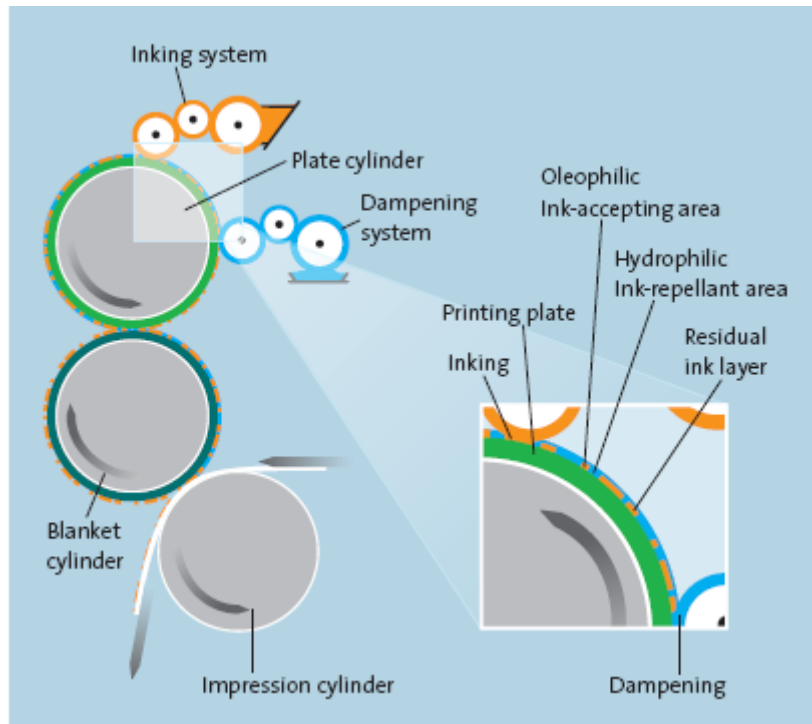


Fig. 1.6. Impressió òfset. Font: VDMA

1.2.4 Serigrafia

La serigrafia o *screen printing* és de les tècniques d'impressió més conegudes pel públic degut al seu ús en impressió de samarretes i altres objectes. És la tècnica més madura per a la fabricació d'electrònica impresa ja que s'ha aplicat a la fabricació de circuits impresos des de fa molts anys.

El concepte bàsic és que una tinta viscosa és transferida a través de les obertures d'una malla i dipositada a sobre d'un substrat. La imatge es defineix a través d'una màscara opaca, feta amb un recobriment fotosensible per tal d'obturar les obertures de les zones on no volem tinta, que s'aplica a sobre d'una malla fina. La tinta s'estén sobre la malla amb una rasera flexible que al formar una depressió de la malla fa que la tinta que passa a través d'ella entri en contacte amb el substrat i posteriorment, al continuar la passada de la rasera, s'allunyi del substrat i quedi la tinta dipositada (**Fig. 1.7**). Idealment la malla no arriba a tocar el substrat per això es considera una tècnica sense contacte.

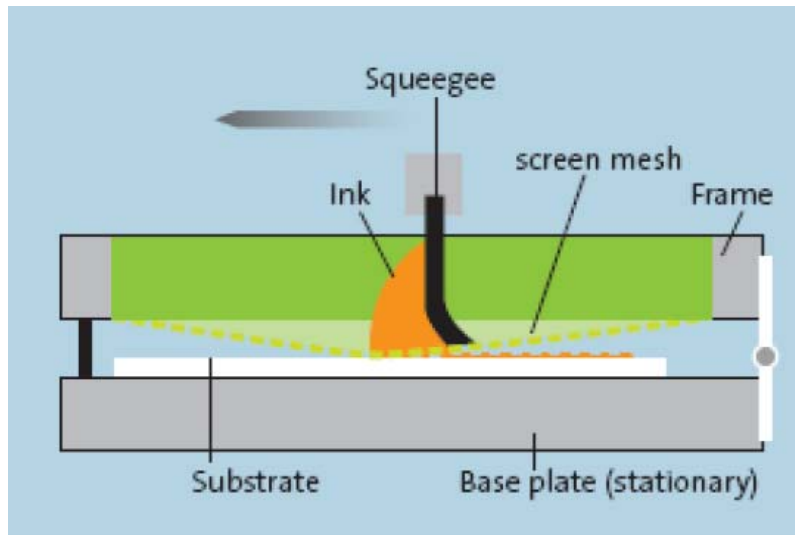


Fig. 1.7 Esquema serigrafia. Font: VDMA

Segons la densitat de filaments que té la malla variarem la resolució de mode que més fils per centímetre més resolució tindrà el nostre dibuix. Els equips comercials d'alta velocitat d'impressió tenen resolucions del voltant dels 50 micròmetres mentre que en recerca s'han aconseguit resolucions per sota dels 10 μm . El gruix de les capes impreses es pot controlar amb la mida de les cel·les que forma la malla, el gruix i mallat dels filaments i/o amb la tinta utilitzada.

En el cas de la serigrafia el desavantatge és l'elevada viscositat necessària de les tintes, encara que no tant elevada com per a l'offset. Com que la tinta es força a través de la malla i per tant s'ha d'aguantar sense recolzament a sobre el substrat, les tintes han de ser molt viscoses (pastoses) per a que no s'escampin excessivament i vessin a la zona que no deuen.

L'avantatge que presenta com es pot observar a la **Taula 1.1** és que permet crear capes de major gruix que les altres tècniques amb una sola passada mentre que amb les altres tècniques n'hauríem de fer varies.

1.2.5 Injecció de tinta

La tècnica de la injecció de tinta a part de ser de les més conegudes gràcies a les impressores d'ús domèstic però també s'utilitza per imprimir cartells de grans formats per a publicitat en façanes o vehicles amb impressores de gran format com la de la **Fig. 1.8**. Per diversos motius és la tècnica més activa i utilitzada per imprimir circuits electrònics actius en l'actualitat.



Fig. 1.8 Impresora NUR Expedio 5000 (Ara HP Scitex 5300)

En aquest mètode gotes molt petites de tinta són ejectades des de capçals d'impressió mitjançant efectes tèrmics o piezoelèctrics. En els tèrmics l'escalfament d'una placa causa una bombolla de vapor que genera i ejecta una gota de tinta (**Fig. 1.9 esquerra**). En els piezoelèctrics, els més utilitzats actualment, la gota és generada per la pressió que exerceix un transductor, a partir d'una ona elèctrica, a una cambra interna que força la tinta a sortir per la boca de l'ejector fins crear una gota (**Fig. 1.9 dreta**). La resolució a la que s'arriba depèn de la quantitat de tinta ejectada (en la nostra impressora 1 ò 10 pL), del control de com s'escampa la gota i de la interacció entre la gota i el substrat arribant a resolucions de l'ordre de μm .

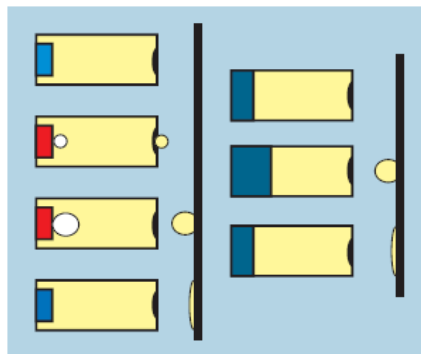


Fig. 1.9 Mecanismes de deposició inkjet. Tèrmic (esq.) i piezoelèctric

Els punts forts d'aquest sistema són que permet l'ús de tintes de baixa viscositat, que l'entrada és digital i que és additiu sense impacte. El primer és molt important ja que permet formular tintes sense aglutinants amb només materials actius i dissolvents. Si afegim el fet de que l'entrada sigui digital, sense necessitar fabricar plantilles o màscares, fa que es puguin fer canvis ràpidament al disseny d'impressió pel qual és de les tècniques més utilitzades en recerca. També al ser un sistema gota a gota es redueixen els consums de

tinta i al ser sense impacte directe permet imprimir sobre gran varietat de substrats.

La viabilitat de l'*inkjet* per a la fabricació dependrà de l'aplicació. En primer lloc al ser gota a gota és lent en comparació als altres sistemes d'impressió descrits anteriorment, es poden aconseguir grans velocitats però són necessaris varis capçals amb molts ejectors, en impressores gràfiques hi ha capçals de fins a 256 ejectors, els quals poden obstruir-se i deixar d'imprimir fent que el circuit finalment no funcioni. La resolució de les impressores és el mínim increment de la posició del capçal que poden realitzar i això, ens pot donar lloc a problemes en el posicionament de les gotes i limita les mides mínimes realitzables. Per últim el més difícil de solucionar és el de patrons pixelats i línies no uniformes degut a la interacció entre substrat i tinta.

Els patrons pixelats són fruit de que es dibuixa gota a gota i per tant depenent de la separació entre gotes i la mida de cadascuna poden passar els efectes que s'observen a la **Fig. 1.10**. Com s'escampa una gota a sobre d'un substrat no és fàcil de controlar ja que cada tinta interacciona de forma diferent amb el substrat fent punts més o menys grans. En tot cas això complica aconseguir costats de les línies rectes i vèrtexs ben definits.

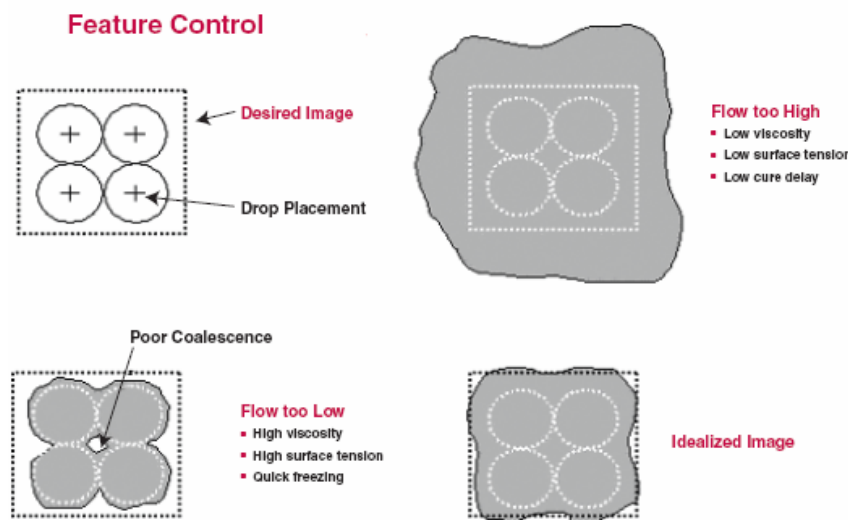


Fig. 1.10 Problema d'interacció tinta substrat.

La formació de les línies a partir d'un seguit de gotes és degut a les forces convectives que es produeixen quan la gota s'asseca. Aquí un dels factors més importants és l'espaiat entre gotes o *drop spacing* (veure [2]) per a una mateixa mida de gota. Quan una gota s'afegeix al final d'una línia ja formada, forces convectives fan que la gota flueixi cap al punt de connexió amb la línia. Si la separació és molt gran, la connexió és massa petita per suportar el flux i per tant la gota s'assecarà abans de formar una línia contínua fent un seguit de gotes separades (**Fig. 1.11 línia superior**). Si reduïm la distància una mica part de la tinta fluirà però no arribarà a fer una línia contínua quedant-nos una recta

ondulada. El cas contrari és si estem ejectant les gotes massa juntes llavors el punt de connexió és massa gran i passa massa material de la gota a la línia. La línia no pot suportar el flux i vessa cap als costats formant protuberàncies. Com la línia augmenta de gruix pot absorbir més tinta fent que el gruix torni a disminuir fins que torna a passar el mateix que abans, per això es sol donar aquest fenomen de forma periòdica (**Fig. 1.11 línia inferior**).

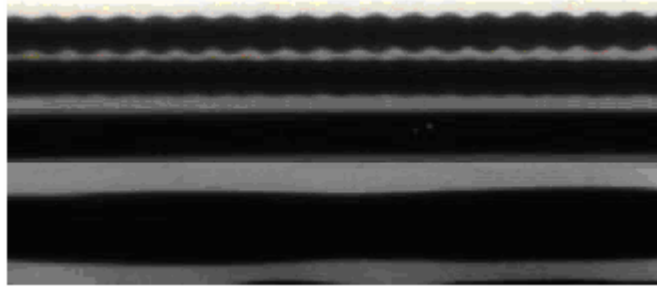


Fig. 1.11 Diferents comportament de les línies impreses. De dalt a baix: gotes separades, ondulada i amb protuberàncies.

Per tot el que em dit sobre *inkjet* es va decidir que aquest seria el sistema que treballàriem al nostre laboratori ja que presenta avantatges a l'hora de fer prototips que els altres sistemes no ofereixen principalment el fet d'estalviar-te equips, temps i costos fent màscares per fer proves de poques mostres.

1.2.6 Altres

La llista de sistemes d'impressió podria ser més llarga però s'ha optat per descriure els més importants ja sigui per ser els més actius en recerca com ara *inkjet* o per ser els que s'espera que s'utilitzin en sistemes de fabricació. N'hi ha d'altres com l'estampat on s'entinta el mestre i es pressiona sobre el substrat, el *nanoimprinting* que ve a ser el mateix però és el substrat el que s'entinta o la impressió directa mitjançant micro-dispensament de tinta de nScript (veure [3]) per exemple.

El fet de que hi hagi tanta varietat de tècniques no vol dir que siguin excloents entre elles sinó que un mateix circuit podria estar fet amb varies d'elles depenent del tipus de patró de la capa o de la compatibilitat dels materials.

1.3 Característiques de les tintes i materials

Actualment s'està treballant molt en les tintes i els materials que les componen . Les tintes han de complir amb diferents propietats físiques i químiques segons el procés al que va adreçada i tindre bones propietats funcionals per satisfer els requeriments dels dissenyadors. Per exemple, propietats com viscositat, tensió superficial o evaporabilitat no són iguals en una tinta per *inkjet* on la viscositat ha de ser baixa per poder-la ejectar com en una per serigrafia la qual ha de ser

més viscosa. El cas ideal seria el ens passa amb les impressores que puguem tindre a casa en el qual el fabricant de tinta, o el mateix de la impressora, ens vengués la tinta preparada per a cada estalviant-nos que no s'ejecti bé o s'embossin els ejectors. Cada impressora hauria de tindre la seva tinta específica per a treballar amb les millors condicions possibles per a l'equip.

Dit això per fer circuits passius el que s'utilitza són tintes basades en partícules metàl·liques per als conductors, pel·lícules de carboni per a fer resistències i polímers pels dielèctrics.

Hi ha dues classes principals de materials els basats en nanopartícules i els basats en polímers. La tendència que hi ha actualment és l'ús de tintes basades en nanopartícules. El que es fa és encapsular partícules de metalls com plata, or o coure amb lligands orgànics (binders). Aquests lligands permeten sintetitzar partícules controlant el seu diàmetre i prevenen de que es facin aglomeracions que provocarien mescles poc homogènies. Aquesta tendència ve donada per dos motius: que les nanopartícules són solubles fàcilment en dissolvents imprimibles i que degut a que cada cop s'augmenta la relació entre àrea de la superfície a volum (diàmetres < 10 nm.) s'ha reduït molt el punt de fusió. Aquestes pel·lícules foses tenen propietats properes a les pel·lícules deposades amb tècniques convencionals.

Les tintes basades en nanopartícules es curen a temperatures baixes, per sota de 250°C , si ho comparem amb la de pastes de plata convencionals (850°C) o la de fusió de la plata (961°C). Aquesta temperatura és important degut a que els substrats l'han de suportar i si és baixa permet utilitzar substrats de baix cost.

Un cop impreses les tintes s'han de curar per a que s'assequin adquirint les propietats desitjades. Hi ha tintes que es curen al forn per tal de crear els lligams entre les nanopartícules però n'hi ha d'altres tipus que no tenen dissolvents que s'han d'evaporar i llavors el procés de curat té lloc entre els ingredients de la tinta i rajos UV procedents d'una font de llum ultraviolada.

Un altre tipus de materials serien els basats en polímers. L'any 1976 el japonès Hideki Shirakawa, Alan MacDiarmid de Nova Zelanda i Alan Heeger d'Estats Units van sintetitzar polímers conductors. Degut a aquest descobriment i al desenvolupament de polímers conductors es va atorgar a tots tres el premi Nobel de química de l'any 2000 (veure [4]). A partir d'aquí van anar millorant-se els polímers amb propietats conductores i semiconductores. Les conductivitats i la mobilitat de portadors no són gaire bones però per a certes aplicacions són suficients i cada cop s'estan millorant.

En quant als semiconductors la mobilitat de càrregues dels semiconductors orgànics està per sota de la del silici (**Fig. 1.12**) però segons el *roadmap* de la OE-A (*Organic Electronics Association*) s'espera millorar-la en els propers anys. Això serà possible amb materials de petites molècules optimitzades i polímers o amb nous materials inorgànics, nanomaterials, nanotubs de carboni o materials híbrids.

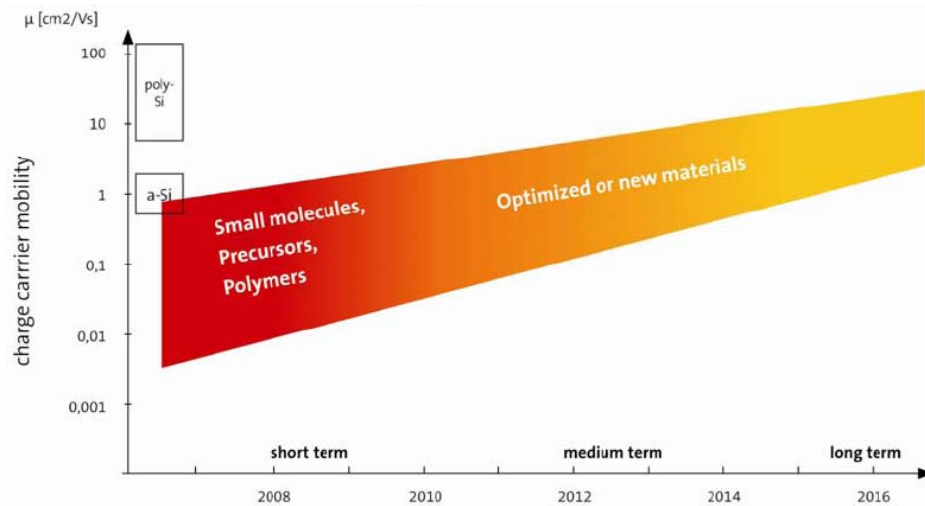


Fig. 1.12 Mobilitat de portadors de càrrega dels semiconductors per a aplicacions d'electrònica orgànica. Font: OE-A Roadmap 2008

Feta aquesta introducció a *printed electronics* es passarà a explicar el treball fet a CEPHIS per veure les capacitats de la tecnologia de la que es disposa en quan a la fabricació de dispositius bàsics.

CAPÍTOL 2. DISSENY I CARACTERITZACIÓ D'ELEMENTS BÀSICS AMB PRINTED ELECTRONICS

L'objectiu d'aquest capítol, com el seu nom indica, és dissenyar i caracteritzar bobines, condensadors i resistències de cara a la posterior utilització en circuits per a RFID (Identificació per radio freqüència). El que no es pretén fer és un model compacte per a cada un d'ells ja que podríem fer un altre projecte dedicat a això. En el nostre cas el que farem serà comprovar si el que mesurem amb els equips de mesura es correspon amb el que s'havia dissenyat prèviament.

Abans es mostrarà els equips i materials que tenim disponibles al nostre laboratori i que farem servir per a la fabricació dels dispositius.

2.1 Descripció d'equips i caracterització de materials

En aquesta secció farem incís en els equips que disposem al laboratori fent una breu descripció de cadascun d'ells per veure on estan els seus límits. A més a més per poder simular correctament és important saber quines característiques tenen els materials que fem servir. La informació que donen els fabricants sobre les propietats elèctriques de les tintes és minsa i per tant s'ha tingut d'obtenir de forma experimental.

2.1.1 Impressora de materials Dimatix

En quant a equips al nostre laboratori es disposa d'una impressora de materials Dimatix DMP-2831 (**Fig. 2.1**). Aquesta utilitza capçals *inkjet* d'un sol ús que s'omplen per part de l'usuari amb el material/tinta que es vulgui depositar. Aquests capçal és piezoelèctrics, disposa de 16 ejectors i n'hi ha dos tipus: de gotes d'1 ò de 10 picolitres. La repetibilitat que ens ofereix és de $\pm 25 \mu\text{m}$ i la exactitud en el moviment del capçal és de $\pm 10 \mu\text{m}$. L'espaiat entre gotes que podem fer és de 5 a 256 μm . en increments de 5 μm i per tant controlant l'espaiat, el tipus de cartutx i l'ona amb que ejectem podem fer gotes més o menys grans. Tant el capçal com el plat sobre el que es situa el substrat es poden escalfar per controlar com s'escampa la gota a sobre el substrat.



Fig. 2.1 Dimatix Material printer DMP-2831

Aquesta impressora disposa d'una càmera fiducial que ens permet veure, des de dalt, el punt on anem a imprimir. Amb aquesta càmera i l'ajut d'unes marques al substrat marquem el punt inicial d'impressió i podem corregir si hi ha una rotació al substrat. Per exemple quan s'imprimeix una capa la tinta s'ha de curar traient el substrat de la impressora i és molt important tornar a centrar-lo per a la següent passada sinó el circuit segurament no funcionaria.

Aquesta impressora disposa d'un software que permet passar de gerber (format d'arxiu utilitzat en el disseny de pcb) a mapa de bits i al format propietari que fa servir. Aquestes conversions poden donar lloc a errors ja que provoquen successius arrodoniments i que finalment s'acaba fent una conversió de píxels a gotes depenent del *drop spacing* escollit on ens pot passar el que veiem a la **Fig. 2.2**.

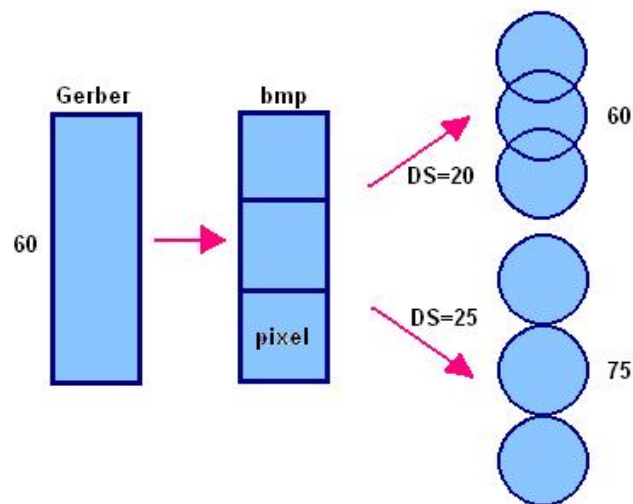


Fig 2.2 Error impressió degut a DS amb diàmetre del punt de 25 um

2.1.2 Tintes i substrats

Es disposa de dues tintes conductores i de dues dielèctriques. Les conductores són la SunTronic Jettable Silver U5603 de SunChemical que conté un 20% de nano-partícules de plata i la Baytron P Jet d'H. C. Starck basada en el polímer conductor PEDOT:PSS (Poli(3,4-etilendioxitiòfè) : poli(estirensulfonat)). De les seves propietats elèctriques els fabricants proporcionen un rang de conductivitat de $3,3 \cdot 10^6$ a $20 \cdot 10^6$ S/m i de 30 a 90 S/m respectivament. En quant als dielèctrics disposem del Luxprint 8153 de DuPont, amb constant dielèctrica de 8, apte per a serigrafia i del Suntronic Jettable Insulator U5388 de SunChemical per *inkjet* que serveix d'aïllant en aplicacions de baixa constant dielèctrica ($K = 4,2$).

En quant al procés de curat les conductores i la de DuPont es curen al forn escalfant-les a temperatures entre 100°C i 200°C un temps entre 10 i 30 minuts depenent de cadascuna d'elles. El dielèctric de SunChemical es cura amb una làmpada UV i posteriorment s'ha d'escalfar a 150 °C durant 30 minuts. Podem veure un resum de les tintes a la **Taula 2.1**. Com veurem en el pròxim apartat el curat de les tintes és molt important ja que depenent del temps i temperatura la tinta adquireix més o menys conductivitat.

Taula 2.1 Tintes disponibles

Tinta	Conductivitat (S/m)	K	Curat
U5603	$3,3 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	-	Tèrmic
Baytron P Jet	30 - 90	-	Tèrmic
U5388	-	8	UV + tèrmic
Suntronic k=4.2	-	4,2	UV + tèrmic

Es treballarà amb tres tipus diferents substrats: paper fotogràfic com a exemple de substrat de baix cost, un substrat de PET (politerftalat d'etilè) que és el plàstic de polièster amb que es fan la majoria d'ampolles de begudes i el Kapton que és un substrat de poliamida de DuPont. Aquest últim és el que millors prestacions ens ha donat en quant a qualitat dels dibuixos i també per que aguanta temperatures per sobre de 200 °C sense deformar-se en canvi el PET a partir d'aproximadament 120 °C ho comença a fer.

La caracterització dels substrats s'ha fet amb un *split cylinder resonator* que és un ressonador que la seva freqüència de ressonància varia amb el valor de la permeabilitat del material que situem al seu interior. Així podem extreure la seva constant dielèctrica i la tangent de pèrdues (**Taula 2.2**).

Taula 2.2 Característiques dels substrats

Referència	Gruix [μm]	Er	Tangent de pèrdues
Kapton	75	$3.51 < E_r < 3.6$	$0.0099 < \tan \delta < 0.01$
PET	75	$3.24 < E_r < 3.34$	$0.00485 < \tan \delta < 0.00489$
Paper	250	$2.99 < E_r < 3.4$	$0.034 < \tan \delta < 0.048$

2.1.3 Influència del temps de curat en la resistivitat.

En primer lloc es vol comprovar si el temps de curat de les tintes influeix en la resistència que presenten un cop acabat el procés. Això és important degut a que s'ha de fixar un procés de curat per tal d'aconseguir unes propietats el més homogènies possibles. En aquest test definim el patró de la **Fig. 2.3** format per 4 línies iguals de 2 cm per 250 μm les quals tenen contactes suficientment grans per poder fer mesures amb un multímetre digital. S'escull la tinta U5603 ja que al ser la més conductora que es disposa és la que es farà servir més sovint per imprimir i s'imprimeix amb capes, temps de curat i temperatures diferents.

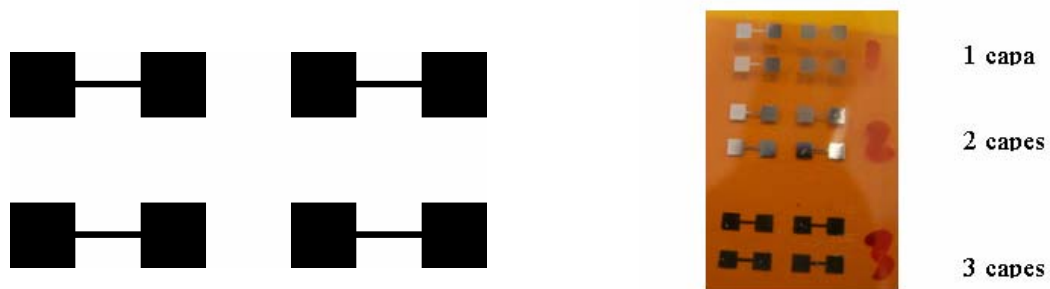


Fig. 2.3 Patró de test de curat

Un cop impresos es fa la mitjana de la resistència que presenten els 4 patrons de cada joc imprès amb diferents paràmetres. A la **Fig. 2.4** veiem un gràfic amb el valor de resistència obtingut per diferents temperatures i temps de curat amb circuits de 1, 2 i 3 capes:

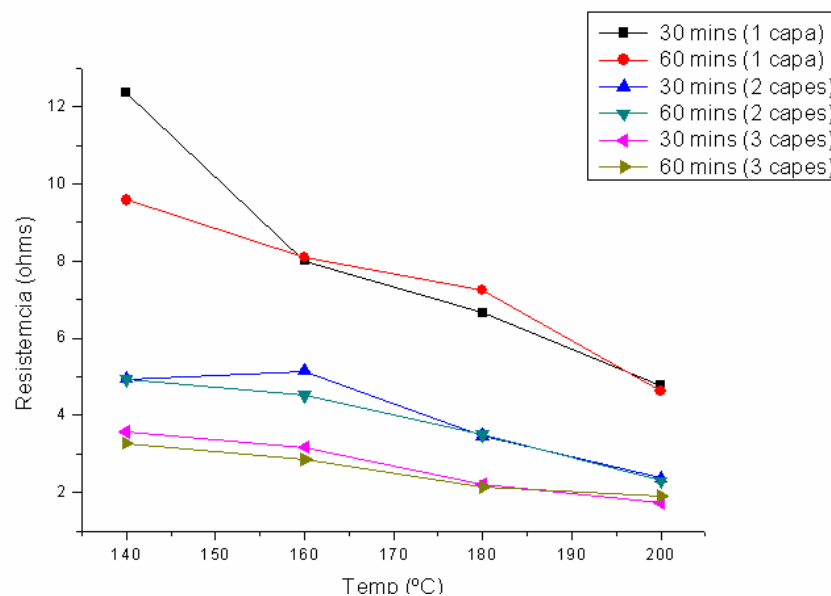


Fig. 2.4 Relació resistència VS temperatura de curat

Com era d'esperar quan s'augmenta el número de capes la resistència evoluciona inversament proporcional a l'alçada de la pista, així amb dues capes tenim gairebé la meitat de resistència que amb una degut a que la pista hauria de ser el doble d'alta. També s'observa que a més temperatura de curat major conductivitat presenta la tinta, això era d'esperar degut a que a més temperatura millor polimeritza la tinta.

També s'ha fet un test deixant més de 90 minuts els patrons de test a 140 °C (**Fig. 2.5 esquerra**) i a 180 °C (**Fig. 2.5 dreta**). Com era d'esperar a 140 °C si s'augmenta el temps de curat va millorant la conductivitat de la tinta, sobretot amb una capa, però al fer varies capes el que obtenim és que és molt més gran el guany per fer varies passades ja que varia molt poc en relació al temps. Un fet que no s'esperava és que amb una capa a 180 °C la resistència augmenta, s'està empitjorant la tinta. Quan s'observa el patró es veu que ha perdut el color platejat el qual fa pensar que a tanta temperatura si es deixa massa temps s'oxida.

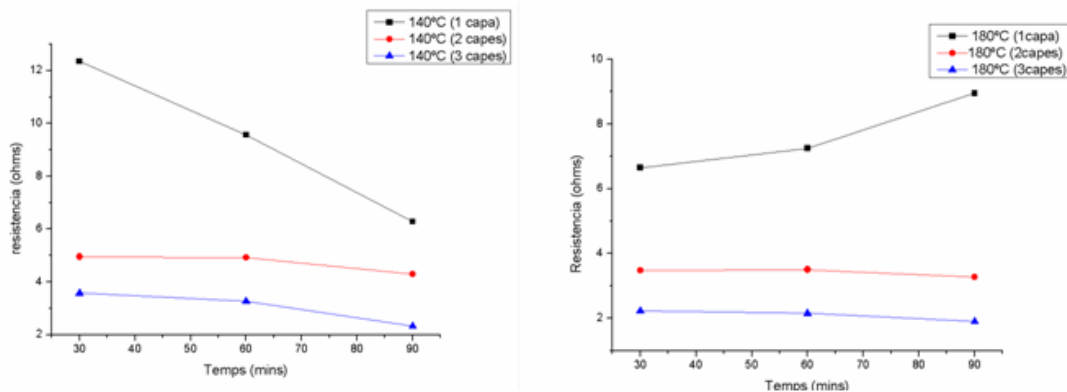


Fig. 2.5 Relació resistència VS temps de curat

Vistes aquestes relacions es decideix fer el procés de curat a 200 °C durant 30 minuts així es tindrà una bona conductivitat sense fer malbé la tinta, el substrat o haver d'esperar molta estona ja que el procés necessari per a fer una impressió ja és llarg de per si. Notar que aquest curat només es pot fer amb Kapton ja que si es fa amb PET aquest pot deformar. En els casos que sigui possible s'intentarà treballar amb 3 capes ja que millora la conductivitat.

2.1.4 Mesura conductivitat de la tinta U5603

Un altre test que és important fer és obtenir una mesura aproximada de la conductivitat d'aquesta tinta ja que a l'hora de fer simulacions aquest és un paràmetre a incloure. Per tal d'aconseguir-ho es fa el patró de test de la **Fig. 2.6** el qual consisteix en pistes de diferents longituds i amplades.

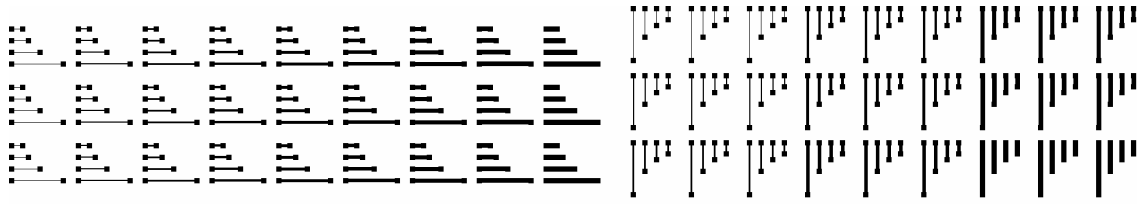


Fig. 2.6 Patró de test de conductivitats

Un cop impreses es mesuren les mides de cada pista amb un estereomicroscopi Leica S8APO i el software que ens permet fer mesures sobre les captures que realitzem. A continuació es mesura la resistència que té cada pista i com també coneixerem les dimensions podrem extreure la resistència de quadre **(2.1)** i la conductivitat. Aquesta resistència ens servirà posteriorment per saber la resistivitat i conductivitat de la tinta quan puguem mesurar el gruix d'una capa deposada de conductor.

$$R = \rho \frac{L}{Wt} = R_{sq} \frac{L}{W} \quad (2.1)$$

on R_{sq} és la resistència de quadre, ρ és la resistivitat, L la longitud de la pista, W l'amplada i t el gruix.

Entre totes les línies impreses se'n descarten les que tenen resistivitats molt elevades ja que són pistes amb errors d'impressió com talls, motes de pols o molt irregulars **(Fig. 2.7)**.

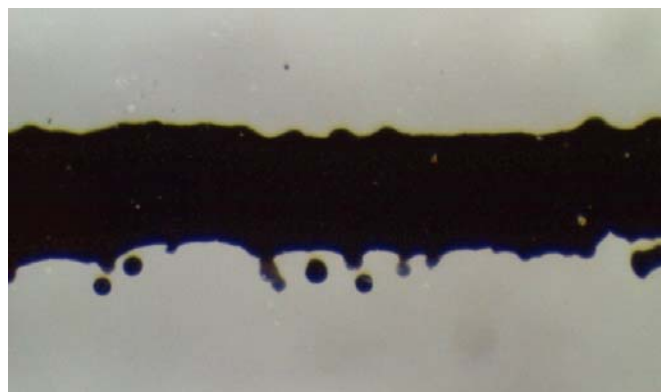


Figura 2.7 Exemple de línia descartada

Quan observem les línies amb un microscopi SEM (*Scanning Electron Microscopy*) veiem que les línies més primes solen presentar zones on tenen amplades molt poc uniformes difícils de quantificar **(Fig. 2.8)** degut al sobreeximent de tinta fora de la línia. Per tant els valors de resistència que ens donaran tampoc els tindrem en consideració.

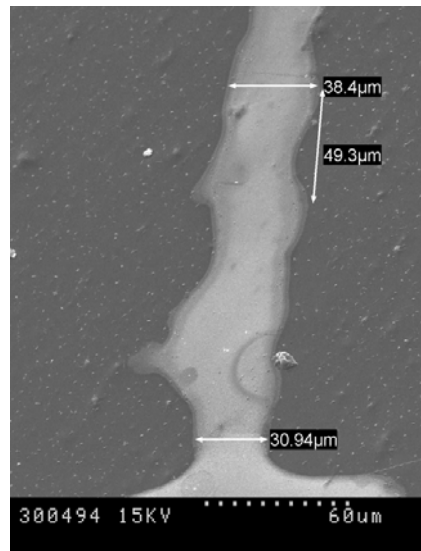


Figura 2.8 Imatge SEM per mostrar les línies primes no uniformes

Per poder fer els càlculs el que ens fa falta és l'alçada de les pistes i per aconseguir-ho farem servir un microscopi confocal Nanofocus 3D amb el que s'obté la mesura de l'alçada que és en mitjana de 200 nm (**Fig. 2.9**).

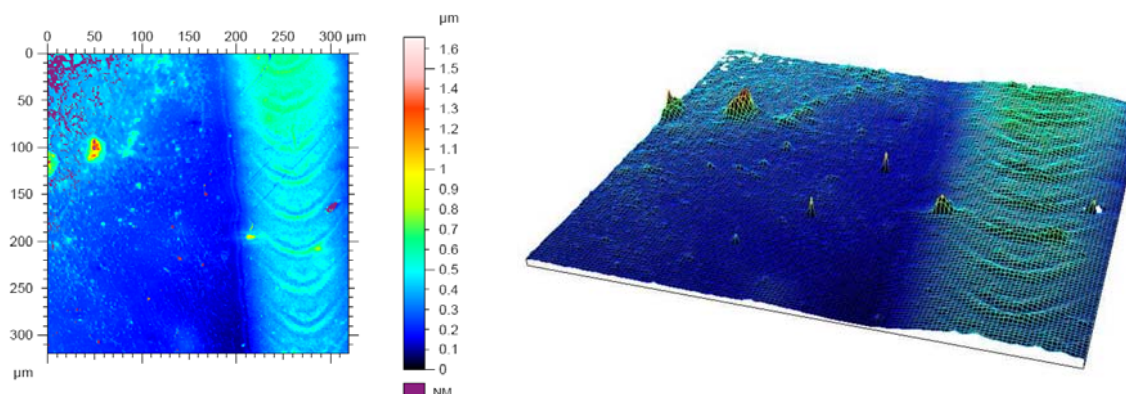


Figura 2.9 Mesures del microscopi confocal Nanofocus 3D

Finalment prenent tots els valor obtinguts de dimensions i resistències es dibuixa el gràfic de la conductivitat i la resistència de full en funció de l'amplada. Com era d'esperar la conductivitat amb amplades petites per sota dels 125 μm no es gaire estable, degut a la no uniformitat de les línies estretes, a partir d'aquí comença a estabilitzar-se al voltant d'aproximadament $1 \cdot 10^7$ S/m amb una resistència de quadre de $0.54 \Omega/\square$.

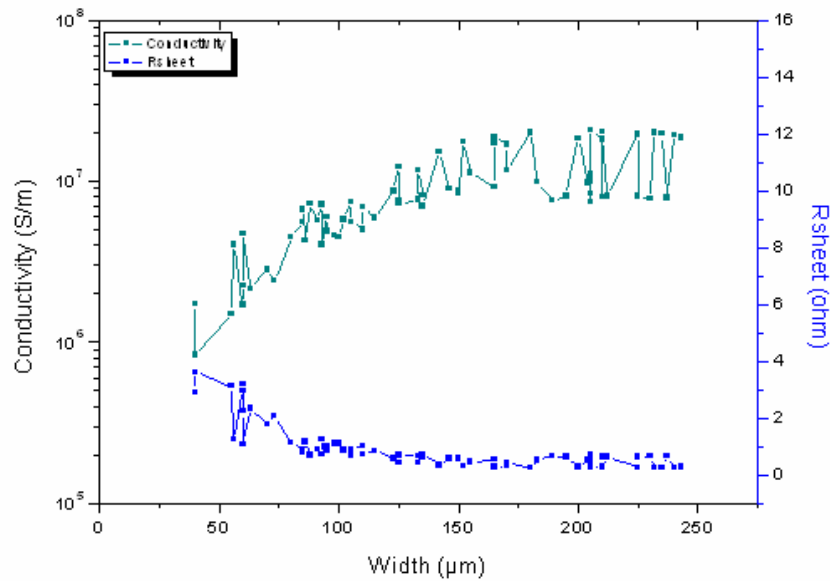


Fig. 2.10 Conductivitat i resistència de quadre VS amplada

En resum, al comparar amb la plata que té una conductivitat de $6,3 \cdot 10^7$ S/m la conductivitat de les línies amples no és gaire elevada i també està gairebé 4 vegades per sota de la de l'alumini que és de $3,8 \cdot 10^7$ S/m. Això vol dir que es poden intentar fer dispositius amb aquesta tinta però a costa de tenir valors de resistivitats elevats que en alguns casos es podran tolerar. Per determinades aplicacions seria millor treballar amb una tinta que contingui més plata en cas de poder aconseguir-la.

2.2 Disseny i caracterització de resistències

El primer element bàsic que es vol estudiar són les resistències per veure la viabilitat d'imprimir-les directament als circuits. Com sabem la seva resistència segueix l'equació (2.1). Segons això per a la fabricació de resistències s'hauria de fer servir un material que presentés una elevada resistivitat. Com s'ha vist anteriorment, la tinta d'H.C. Starck té una conductivitat baixa d'entre 30 i 90 S/cm per tant el que es farà és fer resistències amb ella.

El procediment serà imprimir el patró de la **Fig. 2.11** sobre Kapton i mesurar els valors inicials de les resistències que s'han imprès per fer-nos una idea inicial del rang de valors que es podria aconseguir i per avaluar la tinta per aquest ús.

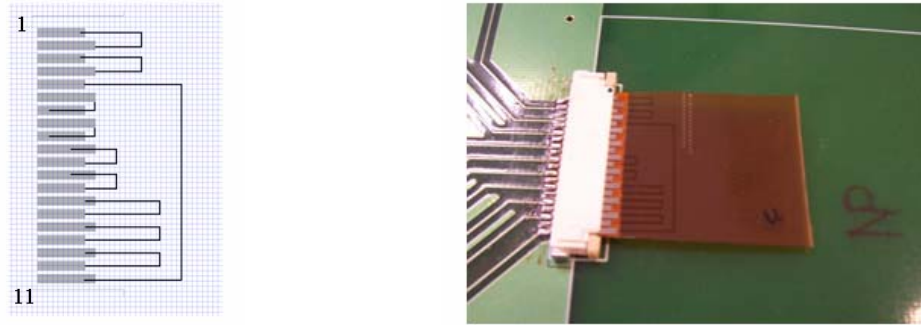


Fig. 2.11 Patró per a l'estudi de resistències

Encara que a la foto anterior es vegin les línies, la tinta és transparent i quan es volen mesurar les longituds i amplades al microscopi aquestes a penes es veuen i per tant els valors de les mesures no serien molt exactes. Degut a això el que es fa és mesurar la resistència i veure la dependència amb la temperatura de la tinta de PEDOT:PSS. De les pistes impreses n'hi ha que no condueixen ja que s'haurà patit algun defecte d'impressió i els valors dels tres jocs els veiem a la **Taula 2.4** 6 d'on s'extreu que el rang aconseguit aniria dels pocs $k\Omega$ als centenars de $k\Omega$.

Taula 2.4 Valors mesurats de resistència

	R1(K Ω)	R2(K Ω)	R3(K Ω)
1	--	--	57.34
2	--	151.9	--
3	--	--	--
4	--	--	12.27
5	18.06	--	--
6	--	43.08	--
7	--	--	36.15
8	--	87.5	69.7
9	58.68	87.4	--
10	--	--	63.4

El que s'observa és que el valor de la resistència també varia depenent de quan la mesurem, així al llarg del primer dia la resistència 6 del tercer joc augmenta el seu valor en 200 Ω (**Fig. 2.22 esq.**). Mesurant-la al llarg de 25 dies veiem que passa aproximadament de 38 a 46 $k\Omega$ amb un creixement bastant lineal (**Fig. 2.22 dreta**). Això potser degut a que la temperatura mitja augmenta o a altres factors.

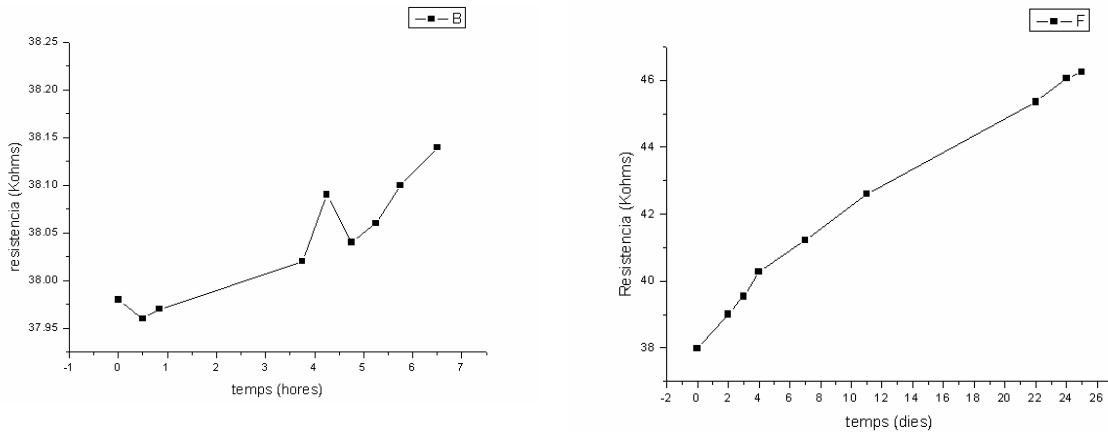


Figura 2.22 Resistència VS temps a temperatura ambient.
Esquerra: $\Delta t = 8$ hores. Dreta: $\Delta t = 25$ dies.

Per veure la variació amb la temperatura es farà servir un forn per controlar la temperatura a la que està la mostra realitzant un escombrat de 30 fins 55 °C. Com veiem a la **Fig. 2.23** la variació amb la temperatura és bastant lineal en una primera aproximació segueix l'equació $R = 64,53 - 0,7 \cdot T$. Així això ens fa pensar que ja que com a resistència canvia el seu valor, es podria fer servir de sensor de temperatura.

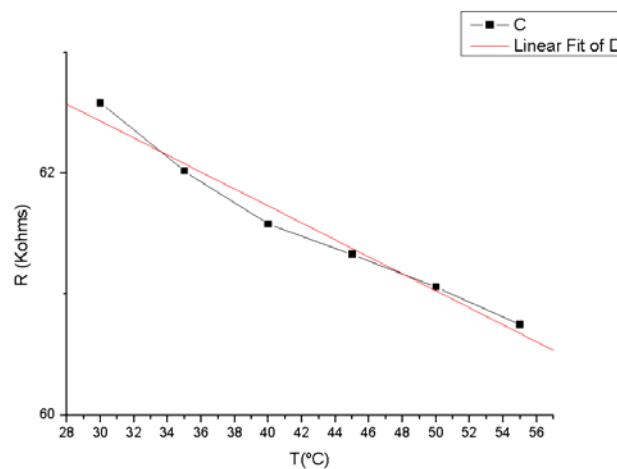


Fig. 2.23 Relació resistència VS temperatura

Com hem vist la resistència varia amb la temperatura però també ho feia amb el temps. Com abans no es controlava la temperatura a la que estava la mostra durant les mesures el següent pas és utilitzar un forn a temperatura constant a 30 °C i veure si continua variant. Ara es mesuren dues resistències diferents i pel que veiem continuem tenint un creixement aproximat de 200 Ω cada 8 hores (**Fig. 2.24 esqu.**) i que no depèn de la temperatura. El problema és que aquest creixement no és lineal al llarg dels dies (**Fig. 2.24 dreta**) i fa que tinguem variacions de fins a 8 k Ω en 28 dies.

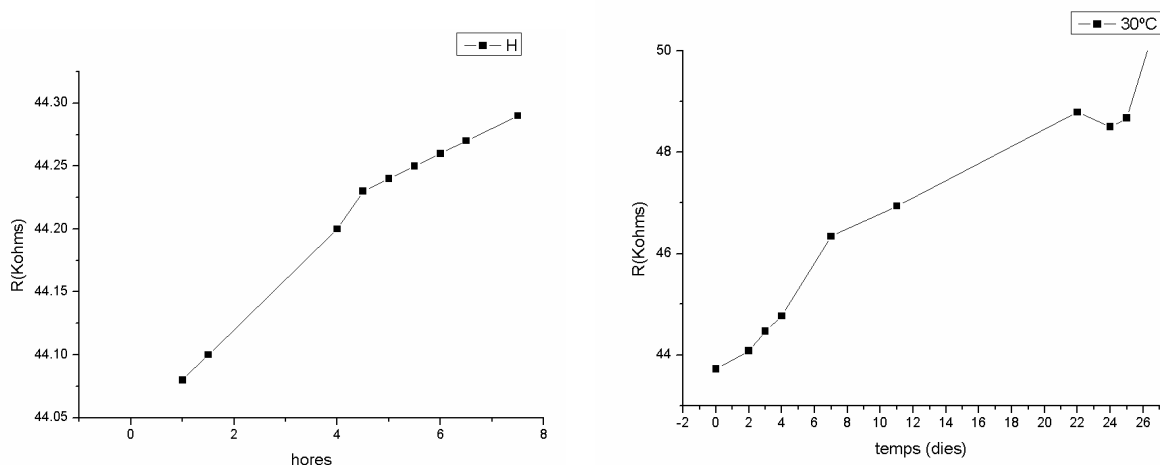


Fig. 2.24 Resistència VS temps, temperatura 30 °C

També s'ha fet la combinació d'ambdós proves, fer deu escombrats de temperatura i al llarg de 25 dies. Com veiem a la **Fig. 2.25** la pendent a cada dia és manté però hi ha un factor que fa que el punt de tall variï entre els dies i de forma no lineal. Per tant no ens serveix per fer de sensor de temperatura ni com a resistència ja que els seus valors varien en excés, més d'un 40% en el cas de sota.

Aquest increment de la resistència és un dels principals problemes que tenen les tintes orgàniques polimèriques com el PEDOT:PSS. És degut a que aquestes molècules orgàniques absorbeixen fàcilment les molècules d'aigua i d'oxigen tot augmentant la seva resistivitat tal i com succeeix (veure [5]). S'està fent molta recerca en fer pel·lícules de barreres polimèriques encapsulant els dispositius per parar aquesta degradació de la tinta polimèrica o l'oxidació de les pel·lícules de tintes metàl·liques.

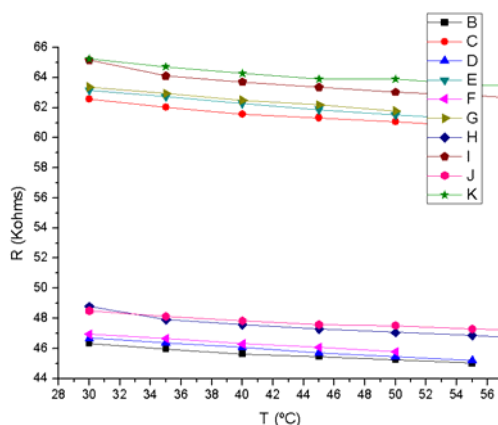


Fig. 2.25 Varies mesures de R VS escombrat de temperatura en diferents dies

2.3 Disseny i caracterització de condensadors

Un altre dispositiu bàsic que volem caracteritzar són els condensadors que són dispositius que emmagatzemen càrrega elèctrica. Degut a aquesta propietat són molt utilitzats en filtres o per desacoblament de dispositius i per tant ens seria molt útil poder implementar-los directament sobre el substrat. Entre els diversos tipus que hi ha, se'n veuran dos, els de plaques paral·leles i els interdigitals.

2.3.1 Condensador de plaques paral·leles

El primer tipus de condensador que es vol comprovar i mesurar és el condensador de plaques paral·leles que es podria dir que és el tipus més simple de condensador. Aquest està format per dues plaques conductores paral·leles separades i aïllades elèctricament per un dielèctric que té permitivitat ϵ (**Fig. 2.26**).

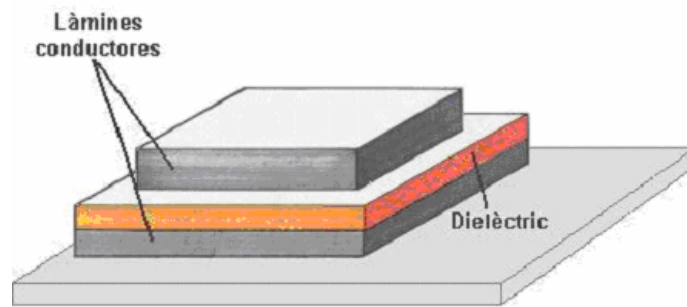


Fig. 2.26 Condensador de plaques paral·leles amb dielèctric

La capacitat del condensador (2.2) depèn de l'àrea de cada pla paral·lel, de la constant dielèctrica K del dielèctric que hi ha entre elles i inversament a la separació entre elles. Així com més gran sigui el valor de la constant dielèctrica més capacitat podem aconseguir amb la mateixa superfície ocupada o el que és el mateix, per un valor fixat de capacitat reduir la superfície necessària per aconseguir-lo.

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{s} \quad (2.2)$$

on $\epsilon = K \cdot \epsilon_0$ és la permitivitat del dielèctric. A la constant dielèctrica K també s'anomena permitivitat relativa ϵ_r i que $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Per tal de veure si concorden les simulacions amb les mesures d'un condensador de plaques paral·leles se'n va fabricar varis mitjançant tecnologia

inkjet per a continuació mesurar-los amb un mesurador RLC per a contrastar els valors mesurats amb els obtinguts a la simulació.

Aquest tipus de condensadors són més complexos d'imprimir degut a que són multicapa i per tant la col·locació i adherència de les diverses capes és molt important.

La tinta que s'ha emprat és la conductora de SunChemical curada a 150°C durant 30 minuts i ejectada amb el capçal de 10 pl amb un espaiat entre gotes de 20 µm. El dielèctric és el SunTronic Jettable Insulator de SunChemical de baixa K amb un valor esperat de la mateixa de 4,2 i el substrat és Kapton de 75 µm.

El primer problema que ens trobem, com s'ha dit anteriorment, és que hi ha una diferència entre el que es dibuixa i el que s'imprimeix degut a les conversions de format i que la tecnologia *inkjet* treballa amb gotes de cert diàmetre i separació entre elles cosa que fa que tinguem una longitud extra a les mides que esperem obtenir.

Les primeres proves d'impressió van donar dificultats. Així com la capa de dielèctric si que s'adheria bé a sobre de la capa inferior de conductor (**Fig. 2.27 esqu.**), la superior conductora no ho feia a sobre del dielèctric (**Fig. 2.27 dreta**) tot i la realització del curat amb una làmpada de raigs UV.

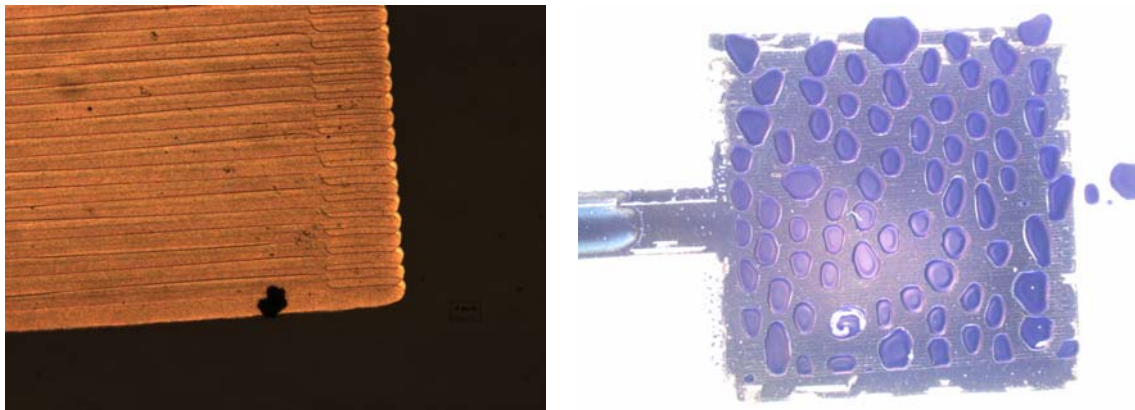


Fig. 2.27 Esquerra: Tinta dielèctrica ben impresa sobre el conductor. Dreta: capa superior conductora del condensador mal impresa.

Després de comentar aquest fet amb el proveïdor de la tinta es va enviar una segona versió de la mateixa que hauria de millorar l'adherència i estabilitat. Amb aquesta nova versió del dielèctric si que es va aconseguir imprimir una capa uniforme de conductor a sobre d'ella (**Fig. 2.28**). L'anella que es forma és deguda a que el dielèctric no s'adhereix igual directament a sobre del substrat que a sobre del conductor. Si es mira una imatge feta amb SEM (**Fig. 2.29**) s'aprecia que hi ha dos anelles, una sobre del conductor forma una anella amb més gruix i l'altra a la part de fora amb un gruix menor.

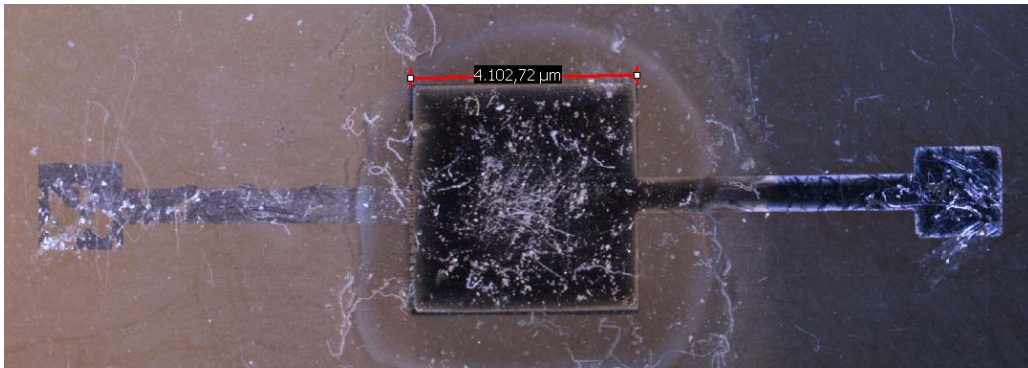


Fig. 2.28 Condensador de plaques paral·leles

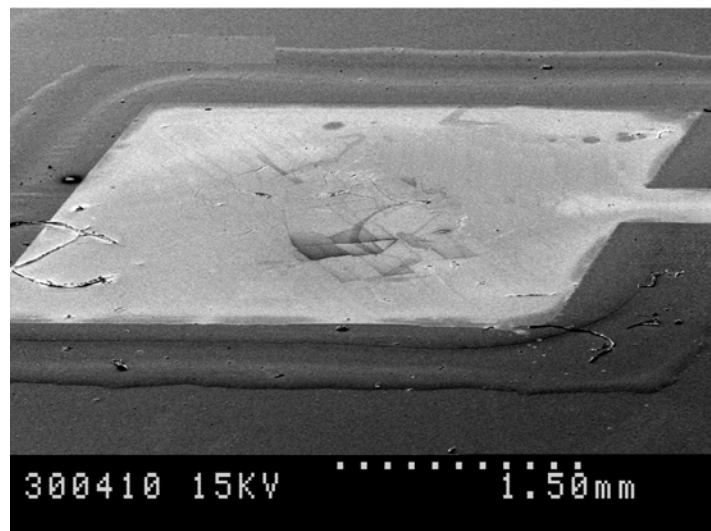


Fig. 2.29 Imatge SEM del condensador

Una forma de controlar la capacitat seria afegint més capes de dielèctric per augmentar la distància entre plaques (també canviant l'àrea de les plaques), això és un problema per a la tinta del contacte superior si el graó que ha de baixar de dielèctric és molt gran no pot omplir-lo i es perd la continuïtat (**Fig. 2.30 esq.**) o es pot trencar (**Fig. 2.30 dreta**). Una solució que s'ha fet servir és la de fer diverses passades per tal d'assegurar connectivitat.

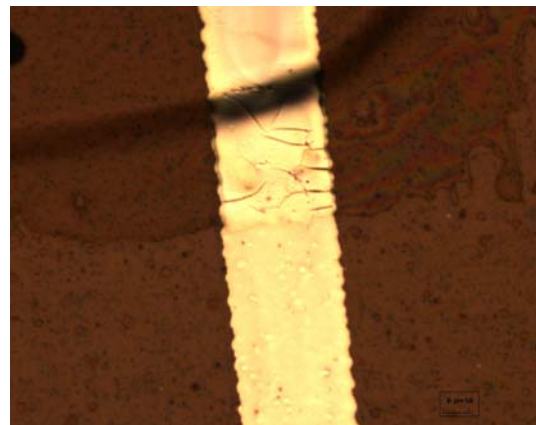
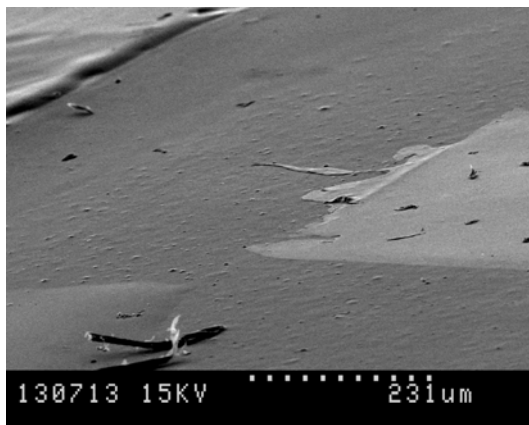


Fig. 2.30 Problema amb el graó de dielèctric

Un altre problema que s'ha trobat en algunes mostres és degut a l'escalfament de la última capa. El procés suposa escalfar i refredar tres cops el substrat, com cada tinta té unes propietats tèrmiques diferents provoquen que la última capa depositada s'esquerdi (**Fig. 2.31**) podent fer que el condensador no funcioni.



Fig. 2.31 Esquerdes produïdes per l'estrès tèrmic

Comentats aquests problemes s'escull el condensador de la **Fig. 2.28** i el mesurem amb el multímetre RLC100 de Digimesh obtenint un valor de 6,6 pF. Aplicant l'equació (2.2) obtenim que el gruix del dielèctric per aquest valor de capacitat hauria de ser d'aproximadament 94 μm el qual és impossible haver-lo aconseguit amb *inkjet*. Això possiblement és degut al produït pel comentat anteriorment: que el dielèctric no és tot l'uniforme que es suposa que és i com es veu a les imatges té parts més gruixudes que altres segons el material que té a sota, impureses i possiblement algun curtcircuit produït pels talls o forats que ens allunyen dels valors teòrics. S'ha de treballar més la fabricació d'aquest tipus d'estructures per obtenir millors resultats.

També s'ha pogut imprimir una sèrie de condensadors amb serigrafia. La resolució és menor per això fem un condensador plano-paral·lel de 10 x 5 mm per fer la prova d'impressió. Aquest s'imprimeix a sobre de paper fotogràfic brillant amb una tinta conductora de partícules de plata i el dielèctric 8153E de DuPont que té una constant dielèctrica de 8. Com amb serigrafia s'aconsegueixen gruixos més grans aquests són més fàcils de mesurar i a la secció d'un condensador amb tres passades de dielèctric veiem que cada deposició fa uns 30 μm de gruix (**Fig. 2.32 dreta**).

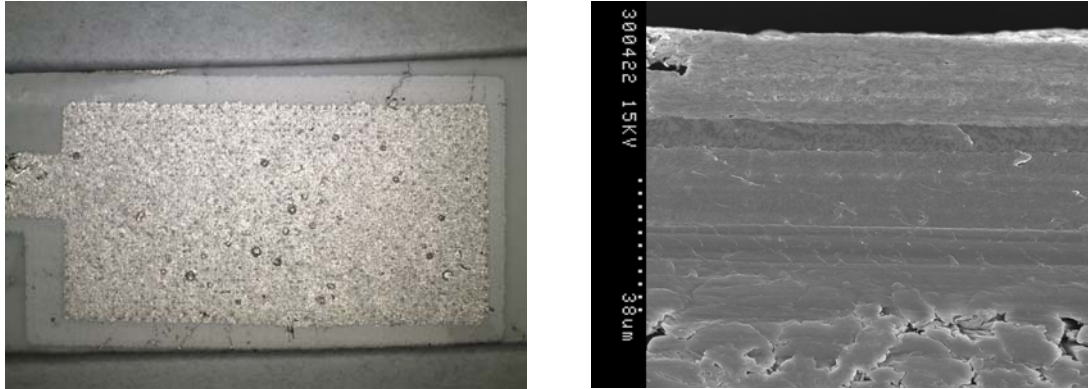


Fig. 2.32 Imatge del condensador serigrafiat (esq.) Perfil de les capes de dielèctric (dreta).

Segons les simulacions amb Sonnet Lite i els càlculs el valor que ens hauria de donar és d'uns 46 pF que està lluny de la mitjana mesurada que és de 1,6 nF. Amb aquest valor de capacitat el gruix de dielèctric hauria de ser de 2,3 μm el qual no és cert. Com s'observa a la figura anterior hi ha bombolles a la superfície del conductor i també irregularitats al dielèctric el que fa canviar els valors de la capacitat. Igualment com en el cas d'injecció de tinta la fabricació de dispositius amb 3 capes és difícil i s'ha d'estudiar més el procés per tal d'evitar l'aparició d'aquests defectes.

2.3.2 Condensador interdigital

En aquest tipus de condensadors la capacitat es dona al llarg dels petits espais que hi ha entre les pistes conductores. Com aquestes són pel·lícules molt fines la capacitat en principi és petita i el que es fa és fer estructures amb molts dits per obtenir un valor més gran de capacitat en una àrea petita. Per a aquest tipus de condensador s'han fet simulacions amb el simulador EM 3D planar Sonnet Lite ja que ens permet simular d'una forma senzilla.

Per a les simulacions s'han fet servir els paràmetres extrets als anàlisis anteriors de les tintes i els substrats. S'han imprès sobre Kapton varies estructures amb la tinta de nanopartícules de plata de SunChemical (**Fig. 2.33**), el capçal de 10 pl, un espaiat de gotes de 20 μm i fent el mateix procés de curat que en la mesura de la conductivitat.

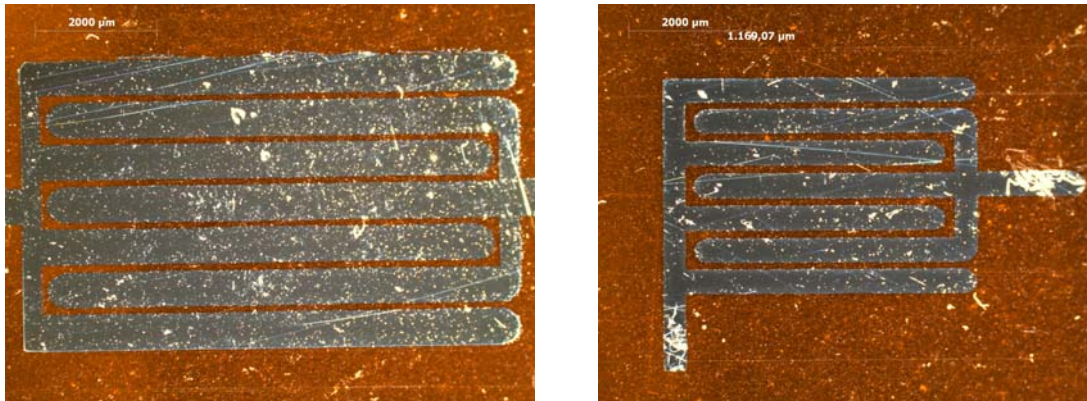


Fig. 2.33 Estructures interdigitals impreses

Els resultats reals s'aproximen molt a les simulacions així, per exemple, segons la simulació el condensador interdigital de la **Fig. 2.34** hauria de tenir una capacitat de 1,8 pF el qual està molt prop del valor mesurat que és de 1,6 pF. Amb els altres dispositius ens succeeix el mateix s'observa una bona concordança entre el que es simula i el que es mesura. Com per fer aquest tipus de condensador no estem fent servir cap dielèctric no hi ha tants problemes amb la simulació.

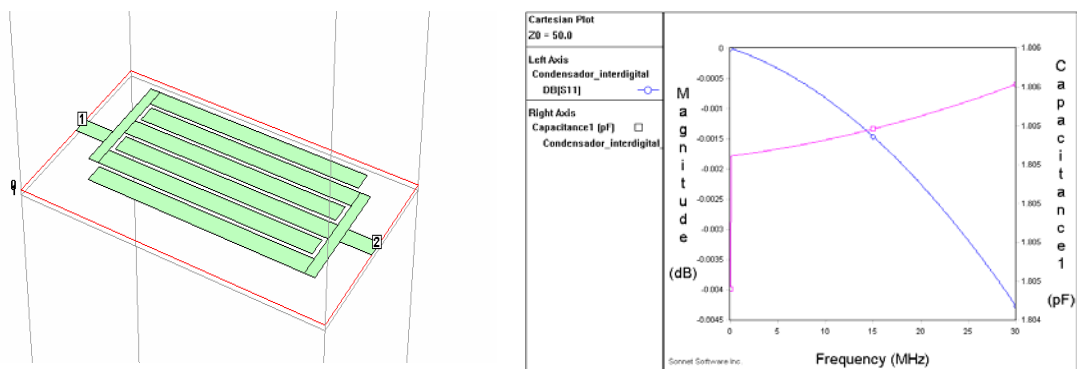


Fig. 2.34. Estructura simulada amb Sonnet i resultat

2.3 Disseny i caracterització d'inductàncies

Les inductàncies són dispositius passius que emmagatzemen energia en el camp magnètic que es crea quan un corrent elèctric passa a través d'elles. En el nostre cas com es treballa amb tecnologia planar ens centrarem amb espirals planes.

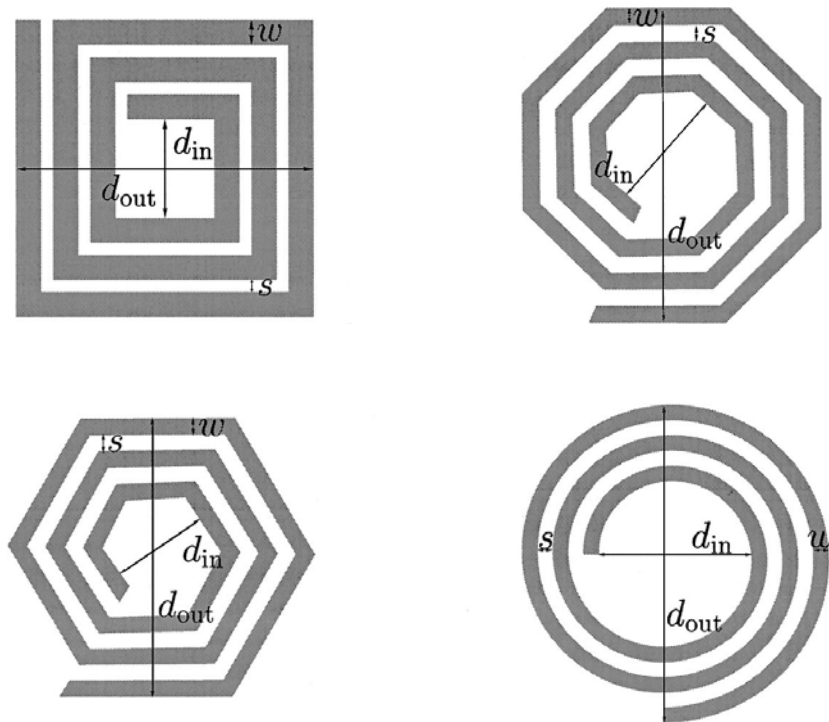


Fig. 2.35 Diferents tipus d'inductors planars.

La impressió es farà amb la tinta de nanopartícules de plata U5603 de SunChemical sobre Kapton de DuPont. En el cas d'aquestes bobines cal treure la connexió de dintre de la espira a fora el qual s'hauria de fer fent una capa de dielèctric en una zona i passant un pont conductor per sobre. Igual que amb els condensadors treballar amb dispositius on són necessàries tres capes complica el procés i per tant s'ha construït sense pont.

S'han imprès varis inductors amb diferents mides i formes amb uns resultats d'impressió bastant bons utilitzant injecció de tinta. Com a exemple el disseny de la bobina plana circular impresa per veure si els valors aconseguits són els esperats.

El primer que ens trobem és que degut al *drop spacing* les línies impreses són $50\text{ }\mu\text{m}$ més amples que les del disseny i per tant s'ha de tornar a simular la bobina amb les noves dimensions (**Fig. 2.36 dreta**).

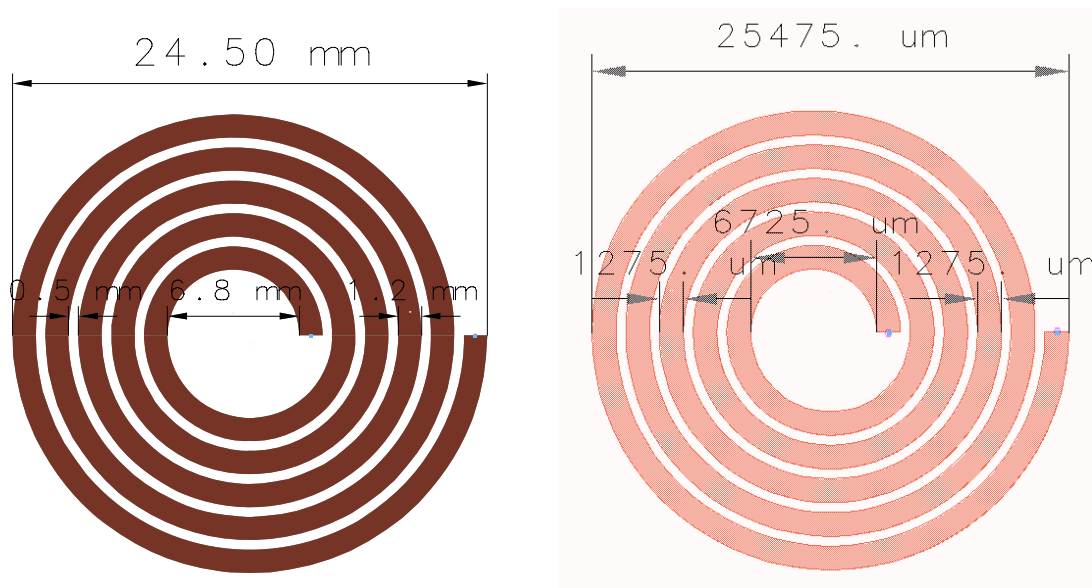


Fig. 2.36 Estructura de l'inductor circular planar.

Als resultat de les simulacions amb els paràmetres extrets anteriorment de la tinta conductora podem veure que tenim un valor de la bobina de 381 nH, però que amb només una capa la resistència sèrie de la bobina serà elevada i per tant tindrem un factor de qualitat de l'espira dolent. El qual ens ve a dir que tenim moltes pèrdues per l'elevada resistivitat de la tinta.

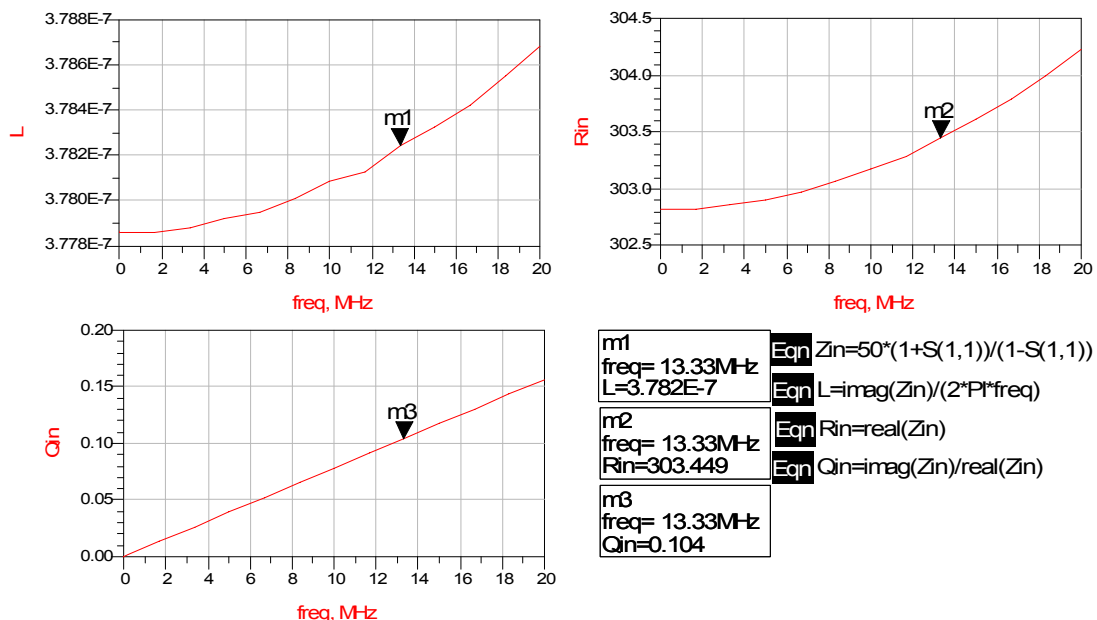


Fig. 2.37 Resultats de la simulació amb ADS.

Hi ha gran varietat d'equacions per obtenir un valor aproximat de la inductància dels inductors planars, des de fórmules empíriques com les de Grover (veure [6]) o Wheeler (veure [7]) a mètodes més complexos com el de Greenhouse (veure [8]). El que ofereix resultats més acurats per al nostre tipus d'espira

(veure [9]) ens dona l'equació **(2.3)** basada en l'aproximació dels costats dels espirals per fulls de corrent simètrics amb idèntiques densitats de corrent. Amb les simulacions obtenim un valor de 381 nH. On n és el número de voltes, d_{avg} és el diàmetre mig ($d_{avg}=0.5(d_{out}+d_{in})$), ρ és un factor depèn de l'emplenament ($\rho = (d_{out} - d_{in})/(d_{out} + d_{in})$) i els coeficients c_i depenen de la geometria escollida (**Taula 2.5**) en el nostre cas circular.

$$L = \frac{\mu_0 n^2 d_{avg} c_1}{2} \left(\ln(c_2 / \rho) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad (2.3)$$

Taula 2.5 Valors dels coeficients c_i

Forma	c_1	c_2	c_3	c_4
Quadrada	1,00	2,07	0,18	0,13
Hexagonal	1,00	2,23	0,00	0,17
Octogonal	1,00	2,29	0,00	0,19
Circular	1,00	2,46	0,00	0,20

Veiem que ambdós resultats, com era d'esperar concorden, però la mesura de la bobina ens dona un valor inesperat de 40 μ H. Tot i això el problema que es té és que com la pel·lícula de conductor té un gruix de 200-400 nm, depenent de les capes, tindrem una resistència sèrie elevada que farà que el factor de qualitat sigui baix. Per tal de millorar-lo s'ha imprès l'estructura amb varies capes però al fer dissenys multicapa i s'han produït curtcircuits per vessaments de les línies.

Veiem que s'hauria de millorar aquesta resistència sèrie per obtenir un major factor de qualitat dels inductors. Per aconseguir-ho es podria fer servir tintes amb més concentració de partícules de plata com la U5714 de SunChemical, aplicar valors de les mides i proporcions de l'espiral per optimitzar la Q, compactar fent pressió i escalfant les diverses capes per millorar la conductivitat ja que s'augmenta la densitat de partícules de plata (veure [10]) o fer inductors multicapa per exemple.

CAPÍTOL 3. DISSENY D'ANTENA PER A TAG RFID

Un dels camps on *printed electronics* està tenint més ressò és en la seva aplicació en RFID (*Radio Frequency IDentification*). Aquest sistema és troba dintre dels sistemes d'identificació automàtica (Auto-ID). Entre aquests sistemes trobem els codis de barres, les smart cards, RFID i els sistemes de reconeixement biomètrics com ara de veu o d'empremtes dactilars. Tots ells serveixen per identificar persones, animals o productes sense que hi intervingui un humà.

RFID a grans trets és una tecnologia per transmetre informació via radio entre un transponedor o *tag* (etiqueta) i un lector quan el segon li envia un senyal per activar-lo. Aquest intercanvi d'informació pot anar des d'enviar un número per identificar un producte, indicar si s'ha pagat o fins a emmagatzemar i enviar dades d'un sensor. Com la comunicació és fa per radiofreqüència no cal línia directa de visió com en els codis de barres.

Les aplicacions actuals que té RFID són moltes i cada cop s'està estenent més. S'utilitza en automatització de cadenes de muntatge on l'aparell a ser muntat porta un *tag* que permet saber en tot moment en quin punt del procés s'està per controlar la cadena. En logística cada cop més ajuda també per poder controlar millor els enviaments facilitant l'escaneig dels volums a enviar. En identificació i pagament de tiquets cada cop més s'està establint RFID, així per exemple el podem veure en els forfaits d'estacions d'esquí, per pagar els peatges als autopistes, en control d'accés de personal en empreses o en bitllets de metro i autobús que podem validar sense treure'ls de la cartera. Així uns quants exemples més com en identificació dels combois de tren mitjançant comunicació tren-via, control de robatoris, protecció de marca i moltes més.

S'espera que gràcies al canvi de tecnologia de fabricació es puguin abaratir els costos en els mercats de grans volums de productes. Fins ara els elements que integren una etiqueta es fabricaven per separat així al cost d'un dau de silici amb l'electrònica se li sumaven els de l'antena i el de la hibridació dels dos per formar l'etiqueta. La seva fabricació totalment impresa faria que fos més barata, flexible i prima podent fins i tot integrar-la en qualsevol objecte, els dit *smart objects*. Per exemple en el mateix procés d'impressió d'una etiqueta d'una ampolla de vi es podria imprimir un tag RFID per poder assegurar l'autenticitat, cobrar-la a la caixa i per controlar els furt. Si s'abarateix aquest sistema podrien arribar a desaparèixer els codis de barres òptics que qualsevol producte porta avui en dia ja que les avantatges que presenta la suma de RFID i *printed electronics* són moltes.

L'any 2007 PolyIC va fer el primer *tag* totalment imprès però utilitzant tècniques convencionals. Només permet tasques de detecció i identificació però la seva fabricació és *roll-to-roll* (**Fig. 3.1**) i en grans volum, no només d'unes poques mostres fetes al laboratori. Les etiquetes fets amb *printed* no s'espera que substitueixin a les convencionals de grans prestacions, amb molta memòria per exemple, sinó a les més senzilles fetes per a aplicacions on el preu és crític pels grans volums o en les que perdre prestacions sigui acceptable.

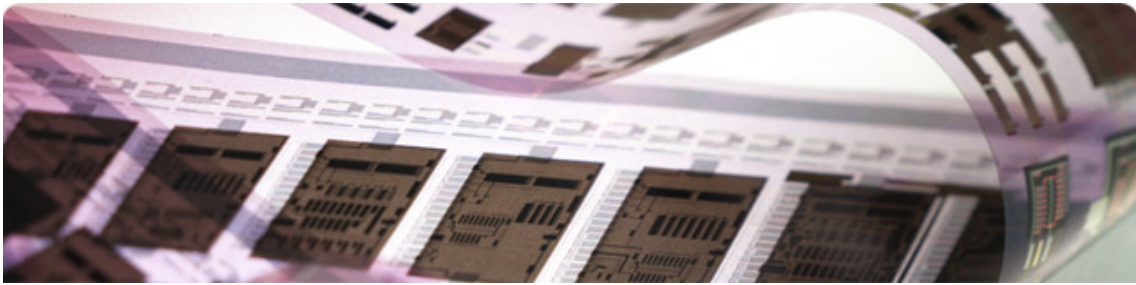


Fig. 3.1 Substrats circuits impresos de PolyIC

L'objectiu en aquesta part de projecte és imprimir antenes per xips RFID de silici i hibridar-los. Primer farem una breu descripció del RFID com a sistema i el seu funcionament per posteriorment dissenyar antenes per a diferents dispositius.

3.1 Sistema RFID

Com s'ha dit abans RFID són les sigles de Radio Frequency IDentification. RFID és un sistema de comunicació sense fils que permet que un lector interrogui a una etiqueta per tal de llegir les dades de l'etiqueta o escriure'n en ella.

El sistema RFID (**Fig. 3.2**) el formen l'etiqueta o *tag* i el lector. Aquests intercanvien informació fent servir diversos tipus d'acoblament depenent de la freqüència de treball tal i com veurem més endavant.

En el funcionament bàsic el lector envia un senyal interrogant als *tags* que té en el seu camp de lectura. Aquest aprofitant la senyal del lector s'alimentaran, processaran la informació rebuda i contestaran modificant el senyal que li arribava amb les dades pertinents com ara el seu número de sèrie, el codi EPC (*Electronic Product Code*. Identificador únic) o altres dades guardades al xip. El lector les rep i mostra la informació rebuda i/o l'envia a un host que normalment es connecta a una base de dades que permet guardar la informació rebuda i gestionar-la.

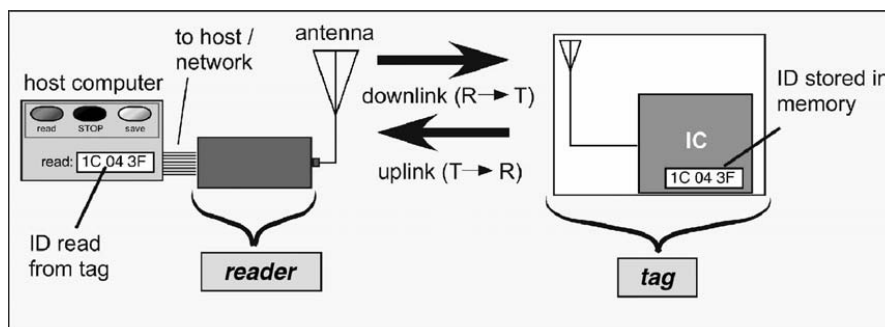


Fig. 3.2 Esquema del sistema RFID. (*The RF in RFID* [11])

Depenent de la complexitat dels *tags* i dels lectors aquesta comunicació pot ser oberta en els més senzills, amb mecanismes d'anticol·lisió o amb la informació encriptada.

3.1.1 Etiqueta o tag

L'etiqueta (**Fig. 3.3**) està formada per un xip i una antena. En els *tags*, com s'ha dit abans, és on s'espera molt de *printed electronics* amb la finalitat de reduir costos en la seva producció.

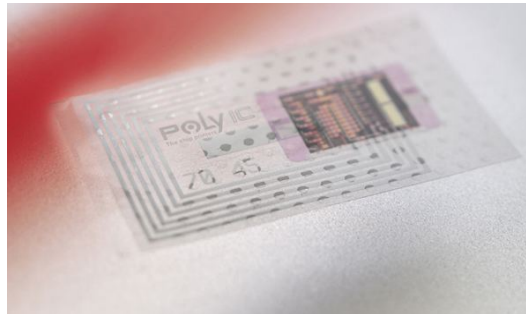


Fig. 3.3 Tag passiu 100 % imprès PolyID

A la **Fig. 3.4** podem veure una descripció esquemàtica d'un *tag* RFID passiu. La senyal RF que arriba per l'antena és rectificadada per aconseguir un voltatge continu per alimentar el circuit i la memòria. La part de la lògica és no volàtil ja que el circuit sol estar apagat però també es sol disposar d'una ROM per emmagatzemar les funcions bàsiques i una RAM. Per un altre costat es desmodula el mateix senyal d'entrada i per processar la informació. Per transmetre la informació de tornada al lector es canvien les característiques elèctriques de l'estructura de l'antena per tal de modificar la senyal que reflexa per modular la informació de tornada al lector.

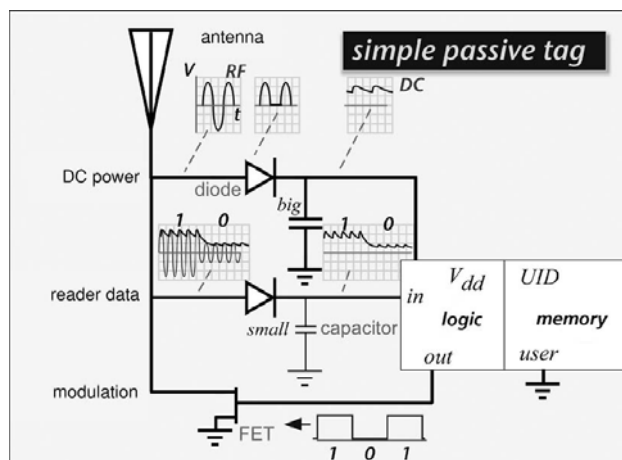


Fig. 3.4 Descripció esquemàtica d'un *tag* RFID. (*The RF in RFID* [11])

El tipus de programació fa que puguin vindre programats de fàbrica, ser programables per l'usuari, ser de només lectura o de lectura/escriptura.

Tot i això la gran diferenciació que es fa dels *tags* és en quan a la seva alimentació (**Fig. 3.5**), així trobem:

- Passius: No tenen bateries. A partir de l'energia del senyal que emet el lector alimenten el xip i retornen la informació modificant aquest senyal.
- Actius: Tenen bateries ja que les prestacions en quant a processat i capacitat que ofereixen són millors. Amb elles alimenten el circuit i generen el senyal per retornar la informació.
- Semipassius: també tenen bateria però aquesta només alimenta el xip, el retorn d'informació es fa modificant el senyal rebut.

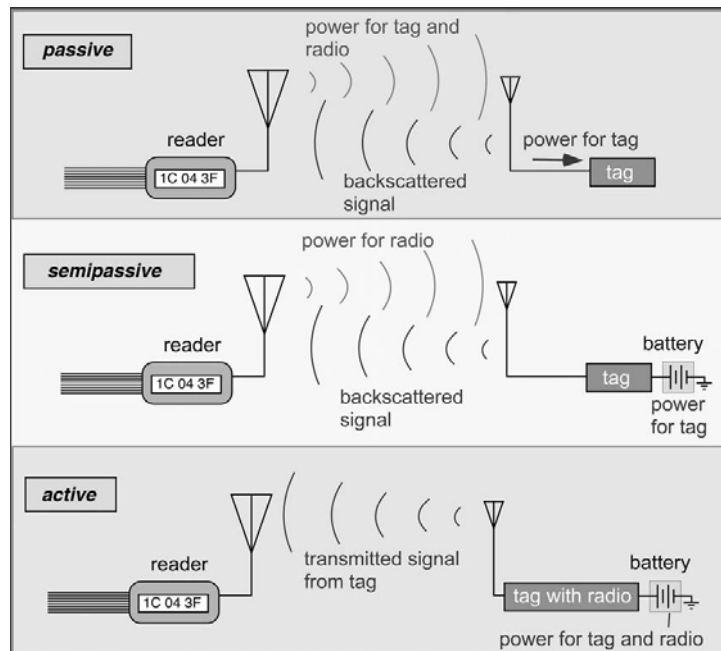


Fig. 3.5 Característiques dels *tags* segons alimentació. (*The RF in RFID* [11])

EPCGlobal és una organització formada per fabricants i organitzacions per tal d'estandarditzar el RFID. Aquesta va crear el Codi de Producte Electrònic (EPC) que identifica cada *tag* de forma única. EPCGlobal classifica els *tags* en classes segons les seves prestacions de la següent manera (veure [12]):

- Classe 1: *Tags* d'identitat passives i amb les següents característiques mínimes: un identificador EPC, un identificador del *tag*, una funció que la desactiva fent que no respongui permanentment, opcionalment control d'accés protegit per paraula de pas i memòria d'usuari.

- Classe 2: *Tags* passius de funcionalitat més elevada. Tenen les mateixes que la classe 1 però a més a més Tag ID ampliat, més memòria d'usuari, control d'accés autènticat i d'altres funcionalitats addicionals.
- Classe 3: *Tags* passius assistits per bateries (semi-passius). Amb les característiques de les classes inferiors però també amb una font d'alimentació per alimentar el tag i/o els seus sensors i pot tindre sensors amb *data logging* opcional. Aquests encara es comuniquen de forma passiva el que significa que necessiten un interrogador per iniciar les comunicacions i envien la informació fent servir tècniques de *backscattering* o modulació de càrrega.
- Classe 4: *Tags* actius. Tenen un codi EPC, un TAG ID ampliat, control d'accés autènticat, una font d'alimentació, comunicacions per un transmissor autònom, opcionalment memòria d'usuari i sensors amb o sense *data logging*.
- Classe 5: Funcionalitat de lector, és capaç d'iniciar comunicacions passives i alimentar *tags* RFID amb la seva senyal. Mateixa funcionalitat que la classe 4.

3.1.2 Lector

El lector és l'altre component dels sistemes RFID. Aquest inicia les comunicacions amb els *tags* enviant-li un senyal per detectar i recaptar la informació dels *tags* que té en la seva zona de lectura.

Encara que s'anomeni lector o interrogador aquest també pot tenir capacitat de lectura/escriptura d'etiquetes, depenent de les seves característiques.

Està format per l'antena, un mòdul de radiofreqüència per emetre i rebre el senyal a l'antena i la unitat de control per processar la informació. Depenent de la seva finalitat i prestacions poden ser portàtils o fixes i normalment disposen d'alguna interfície com USB, RS232, 802.11x, ethernet, etc. Això permet connectar-los a un ordinador o servidor amb una base de dades de productes el qual porta un registre dels productes i processa les dades.



Fig. 3.6 Lector portàtil Turck i lector fix Motorola

3.1.3 Comunicació tag-lector

Depenent de les zones geogràfiques i de les prestacions necessàries del sistema, les bandes de freqüència en els que treballa RFID són diferents. Els podem veure en la **Fig. 3.7**. Per exemple a Europa en UHF es treballa a 860 MHz, a Estats Units a 915 MHz i al Japó a 953 MHz..

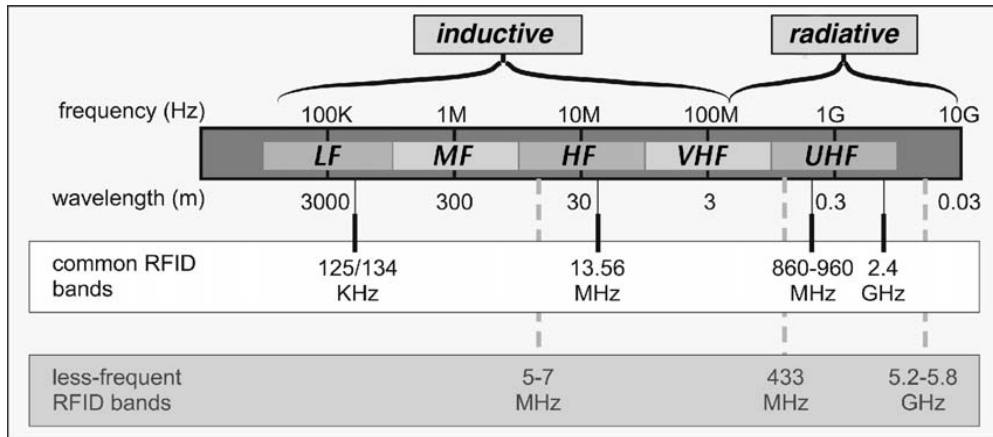


Fig. 3.7 Bandes de freqüència RFID

A cada freqüència la comunicació entre el *tag* i el lector es dóna per diferents tipus d'acoblaments entre els que trobem els dos que faran servir els *tags* que dissenyarem, l'inductiu i el *backscatter*.

- Acoblament inductiu:

Als sistemes de baixa i alta freqüència degut a la longitud d'ona (135 kHz: 2400 m, 13,56 MHz: 22,1 m) el *tag* es trobarà en la zona de camp proper ($d < 0,16\lambda$) el qual s'atenua a raó del cub de la distància i per tant la zona de lectura serà a uns pocs centímetres del lector que és la zona on es concentra l'energia de l'antena de dimensions comparables a ella mateixa. Al trobar-nos en camp proper el camp electromagnètic s'ha de tractar com un camp magnètic que varia amb el temps.

L'acoblament que es dóna en aquesta regió és inductiu com el que hi ha en els transformadors. L'antena del lector (espira) juntament amb un condensador ressonen a la freqüència del lector. Aquesta variació de corrent provoca un camp magnètic que s'acobla a la bobina de l'etiqueta que ressona amb el condensador C_1 induint un corrent al *tag* que es rectifica per alimentar-lo. Quan es vol enviar informació la bobina del *tag* ressona amb C_2 modulant la senyal rebuda per enviar la informació al lector.

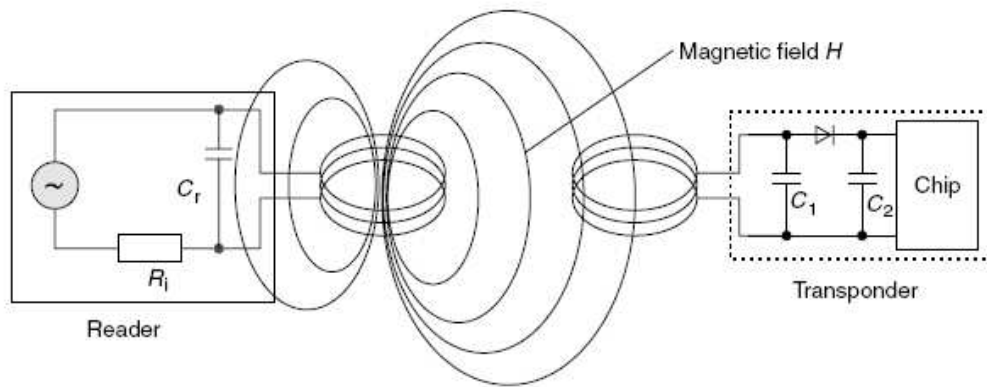


Fig. 3.8 Esquema acoblament inductiu (RFID handbook [13])

L'eficiència de la transferència de potència entre el *tag* i el lector depèn de la freqüència de treball, el número d'espises de les bobines, l'àrea de la bobina del *tag* i la distància i angle entre les dues bobines.

- Acoblament *backscatter*:

Quan hi ha requeriments de majors distàncies de lectura, per sobre d'1 m, s'utilitza la banda UHF (860-960 MHz) on la longitud d'ona és d'uns 30 cm. Ara l'acoblament es produirà pels camps llunyans radiats ja que estarem en aquesta zona.

Igual com en l'anterior acoblament, una part de l'energia rebuda per l'antena s'aprofita per alimentar el xip i l'altra per s'aprofita per tornar la informació al lector. Aquest enviament d'informació es fa variant la impedància de l'antena del *tag* per variar el senyal reflexat cap al lector per modular les dades (**Fig. 3.9**).

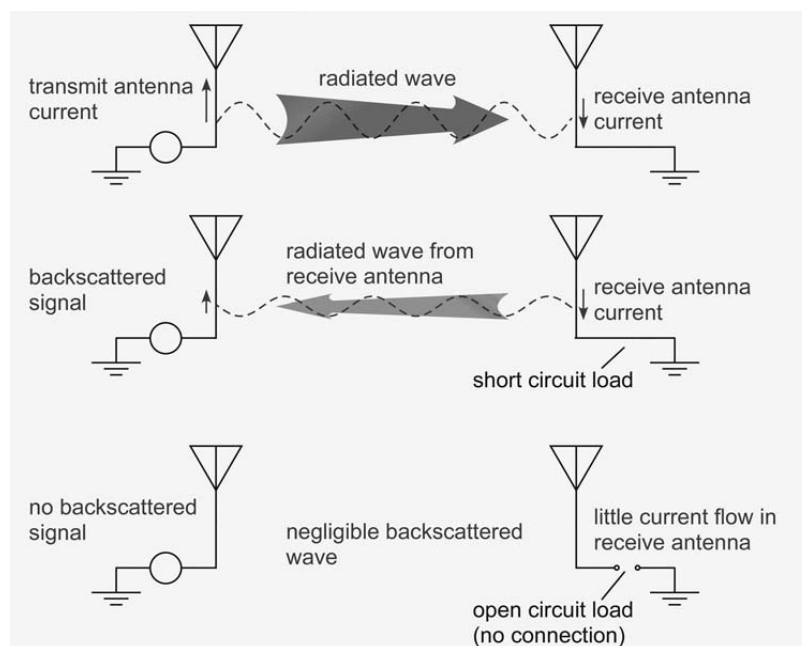


Fig. 3.9 Exemple simple de backscattering. (*The RF in RFID* [11])

Una forma simple de modular aquest senyal és amb un transistor per obrir i tancar el circuit canviant la impedància de càrrega de l'antena (**Fig. 3.10**). El lector rep aquest senyal reflexat i n'obté les dades transmeses pel *tag*. El senyal es sol modular a una freqüència baixa d'uns quants kHz i per tant no cal que el *tag* treballi a freqüències de 960 MHz fet que el faria més complex i car.

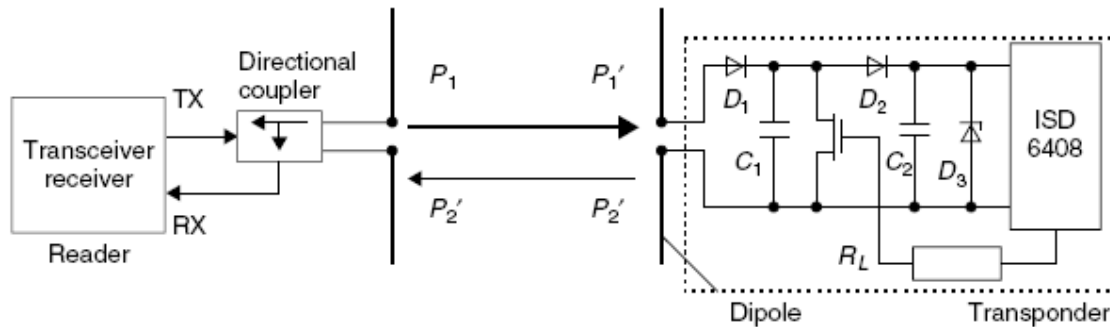


Fig. 3.10 Sistema amb acoblament *backscatter*

3.1.4 Hibridació del tag

Quan parlem d'hibridació ens referim a la tècnica que es fa servir per unir el xip i l'antena per formar el que s'anomena *inlay* o part incrustada de l'etiqueta RFID on a sobre podríem situar un revestiment gràfic.

En quant als xips RFID poden anar encapsulats o també es pot hibridar el dau de silici directament. Els primers tenen unes dimensions d'uns quants mil·límetres però quan parlem de dau nu, aquest pot tindre unes dimensions de 0,8 x 0,8 mm amb uns contactes per a l'antena de 100 x 100 μm com és el cas d'alguns xips de Texas Instruments.

Hi ha 3 tècniques per unir el xip i l'antena depenent del tipus d'encapsulat: unió directa del dau amb *bumps* (bonys) rodons o plans, unió directa del dau amb *bumps* punxeguts i unió indirecta o per a components grans.

La primera es fa servir per daus nus als que se li fa un *bump* conductor rodó o pla als contactes amb l'antena (**Fig. 3.11**). La unió és realitzada amb adhesius conductors anisotròpics. Aquests adhesius tenen una petita quantitat de partícules conductores distribuïdes uniformement de tal manera que entre elles no hi ha conducció. Si s'aplica pressió s'ajunten les partícules en l'eix Z i per tant només hi haurà conducció en aquesta direcció i no en X-Y.

Per unir-los és dispensa adhesiu a sobre de la zona dels contactes de l'antena i fent molta pressió i amb escalfor (150 °C durant uns segons, depenent dels adhesius) l'adhesiu es torna conductor només en aquesta direcció aconseguint que només hi hagi conducció entre els contactes del dau i de l'antena. Aquesta operació requereix de molta precisió per situar el xip i no tanta per l'adhesiu.

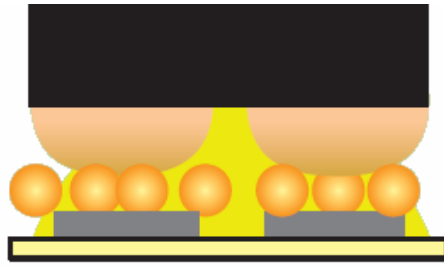


Fig. 3.11 Unió amb adhesius conductors anisotròpics

En el segon cas els *bumps* del dau tenen forma punxeguda i es fan servir adhesius no conductors. S'aplica l'adhesiu a la zona de contacte, es perfora amb el dau fins que arribin les punxes a tocar els contactes de l'antena i fent pressió i a certa temperatura l'adhesiu queda fixat i permet la unió amb contacte directe entre els dos elements (**Fig. 3.12**). També requereix de certa precisió per a situar el xip.



Fig. 3.12 Unió amb adhesius no conductors

La darrera tècnica es fa servir per a encapsulats grans o per a xips als que el fabricant li adhereix un *strap* o tira metàl·lica conductora (**Fig. 3.13**) amb la finalitat de facilitar el seu posicionament. Com la superfície de contacte és més gran i els contactes estan més separats permet fer servir adhesius conductors isotròpics, que estan molt carregats de partícules conductores per a conduir en totes direccions. L'avantatge és que no cal tanta precisió com amb les altres tècniques i facilita la unió.

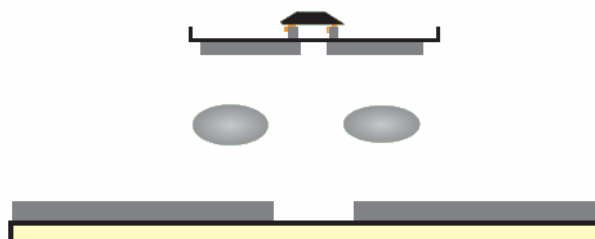


Fig. 3.13. Unió amb adhesius conductors isotròpics

Si s'arribés a fer un *inlay* amb el 100 % dels components impresos directament, no caldria aquest pas i per tant s'estalviarien costos de producció aquest és un dels motius pels quals hi ha tant interès en aconseguir-ho.

Com s'ha dit a la introducció l'objectiu es dissenyar antenes fetes amb tècniques d'impressió per a les 3 bandes més utilitzades de RFID 125 kHz, 13,56 MHz i 860-960 MHz. Com s'escolliran xips amb encapsulats diferents també permetrà fer servir algunes d'aquestes tècniques d'unió.

3.2 Antena per 125 kHz.

Al rang de LF trobem els *tags* passius que treballen a 125 kHz i 134,2 kHz. Al tractar-se de freqüències baixes no afecta la presència de metalls com en les superiors i el senyal penetra l'aigua o els teixits humans. Per això es fa servir per identificar animals i objectes metàl·lics.

En LF l'acoblament és inductiu i per tant l'antena està formada per un circuit ressonant LC amb freqüència de ressonància de 125 kHz ò 134,5 kHz. El circuit bàsic seria el de la **Fig. 3.14** i la seva freqüència de ressonància la trobem amb l'equació (3.1).

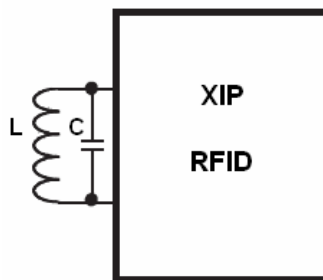


Fig. 3.14 Circuit bàsic de l'antena d'un *tag* RFID

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Ens cal una amb una inductància elevada per a que ressoni a aquesta freqüència baixa. Per a aconseguir això i a partir de la fórmula d'una espira circular (2.3) sabem que el valor de la seva inductància és directament proporcional a la mitjana del diàmetre i al número d'espires al quadrat. Per tant s'ha de fer una inductància planar gran i/o amb moltes espires.

A més a més també és molt important el factor de qualitat de la bobina (3.2) ja que d'aquest depèn l'amplada de banda de l'antena $B = f_0 / Q$. En RFID com més elevada és la Q més corrent s'indueix a la bobina de l'antena i millora l'alimentació del circuit però també fa que l'amplada de banda sigui estreta.

Una amplada de banda massa estreta pot reduir les bandes laterals de les modulacions des del *tag*.

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L_{\text{bobina}}}{R_{\text{sèrie}}} \quad (3.2)$$

Com a més voltes de la bobina major resistència presenta i això empitjora la Q de la inductància. A més a més si això ja és un problema amb antenes fetes amb coure que tenen centenars d'espises per arribar a la inductància necessària amb la pitjor resistivitat que presenta la nostra tinta conductora fa que sigui impossible fabricar-la.

Anem a veure un exemple amb el xip RFID ATA5570 d'Atmel que treballa a 125 kHz. Al seu full de característiques veiem que l'antena es la bobina i un condensador. Se'ns indica que el valor del condensador ha de ser entre 323 i 357 pF. Aplicant (3.1) veiem que la inductància hauria de tindre un valor entre 4,5 - 5 mH.

Suposem que la bobina es vulgui imprimir en una targeta ISO/IEC 7810 ID-1 (85,60 x 53,98 mm) que és la mida estàndard de les targetes de crèdit, llavors per aconseguir el valor desitjat amb una bobina de radi extern de 50 mm i intern de 10 mm ens farien falta més de 400 voltes les quals amb la nostra resolució no podem fer amb una sola capa ja que no ens cabrien.

Per altra banda el valor del factor de qualitat ha d'estar entre 15 i 25 el que imposa, en el cas més favorable, un valor màxim de la resistència sèrie de 282 Ω . És necessarien pistes amples per a baixar la resistivitat però com no caben i en cas de que ho fessin tindria un resistència sèrie gran no podem assolir el que se'ns demana.

3.3 Antena per 13,56 MHz.

Quan estem a la banda d'alta freqüència (HF) l'acoblament continua sent inductiu com en baixa freqüència i l'antena també és una espira. La diferència entre les dues és que al reduir la freqüència de ressonància fa que el producte LC necessari sigui més petit. Això implica que facin falta només unes poques voltes per arribar al valor necessari d'inductància i per tant molta menys quantitat de conductor per construir l'antena.

Com la freqüència és més elevada hi ha més velocitat de transferència d'informació. Els rangs de lectura solen estar al voltant d'un metre i al haver més *tags* a la zona de lectura i disposar d'una major taxa es poden utilitzar protocols anticol·lisió per poder llegir fins a 50 etiquetes per segon situades en aquesta zona.

Per a aquesta antena farem servir els dissenys anteriors mostrats de bobina i condensador per formar l'estructura LC ressonant a 13,56 MHz. Com s'ha vist

en les mesures de la bobina, el problema el tindrem en el factor de qualitat d'aquest ressonador que potser no és suficientment gran en el cas d'impressió per injecció de tinta. Com millor és el factor de qualitat més estreta és la banda de ressonància de l'antena tal com veurem a les simulacions.

3.3.1 Simulacions de l'antena

Prenent com a referència el valor del condensador de plaques paral·leles mesurat abans (1,572 nF) s'han fet simulacions amb ADS per tal de poder veure com afecta la quantitat de capes de l'espira en cas de fer el disseny amb injecció de tinta o amb serigrafia. Amb ADS Momentum es simulen les diferents espirals i es crea un model per poder fer-lo servir a l'esquemàtic del circuit LC.

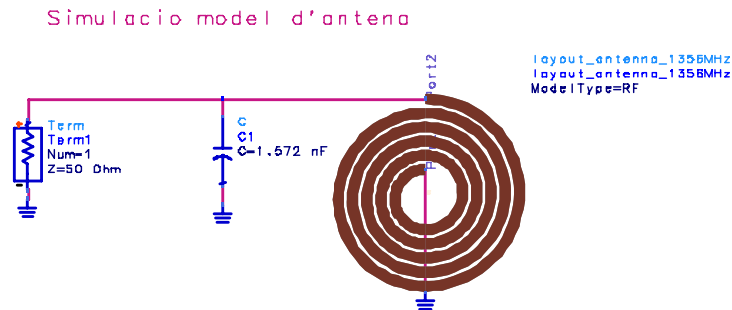


Fig. 3.15 Model de l'antena simulat amb ADS

La següent figura és el resultat d'aquestes simulacions (**Fig. 3.16**). A mesura que es fan més passades, el gruix de les línies serà major i baixarà la resistència sèrie de la bobina, per això cada cop la ressonància està més marcada el que indica que millora la Q. Aquest factor de qualitat (**3.3**) depèn llavors dels valors del condensador, de la bobina i de la resistència sèrie d'aquesta.

$$Q = \frac{1}{R_s} \sqrt{L/C} \quad (3.3)$$

Les quatre corbes superiors són suposant que l'espira està feta amb injecció de tinta amb gruixos de una a 4 passades de tinta conductora, obtenint el pitjor resultat (el de dalt de tot) en el cas de tindre només una capa. Les dos corbes de sota són suposant que s'imprimirà amb serigrafia, el que suposa passar d'un gruix de 200 nm per capa que tenim en *inkjet* a uns 10 µm.

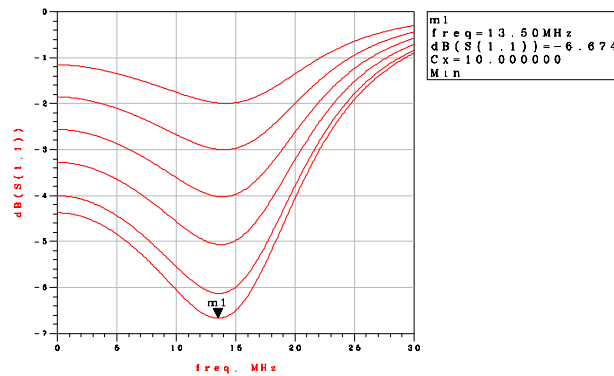


Fig. 3.16 Resultat amb diferents gruixos d'antena.

Amb les dimensions del ressonador s'ha fabricat un prototip amb cada una de les dues tècniques d'impressió disponibles. La utilització del dielèctric d'injecció de tinta al donar problemes s'ha solucionat temporalment imprimint per les dues cares del substrat, així el mateix Kapton fa de dielèctric del condensador. El pas d'una capa a l'altra s'ha solucionat fent una via i aplicant adhesiu conductor isotròpic amb un dispensador EFD Ultra 2400 per tindre conductivitat entre les dues capes.



Fig 3.17 Prototips d'antena amb *inkjet* (esquerra) i serigrafia (dreta)

3.3.2 Mesures del prototip

Per mesurar el prototip de bobina d'antena farem servir un mètode de mesura indirecta. El material necessari per a fer la mesura és un analitzador de xarxes, una espira de prova i l'antena a mesurar.

El procediment és el següent:

- L'espira de prova, que té unes dimensions properes a les de l'antena, es connecta a un port de l'analitzador de xarxes.

- Es configura l'analitzador per fer un escanament de freqüències de 10 a 15 MHz per veure el S_{11} amb una potència de -10 dBm que és el mínim nivell detectable o sigui el valor mínim de potència per alimentar el tag.
- Situem l'antena dintre del camp generat per l'analitzador de xarxes a través de l'espira de prova ubicant-la a uns 0,5 cm de l'espira.

L'analitzador que fem servir és un E5071C d'Agilent i l'espira de prova fa 6 cm de diàmetre. Un cop tenim tots els elements connectats com veiem a la **Fig 3.18** a l'analitzador podem veure la freqüència a la que ressona.

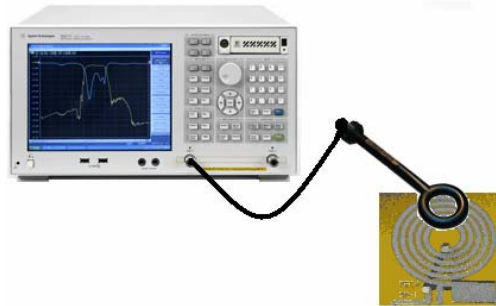


Fig 3.18 Set de mesura per a 13,56 MHz

Com veiem a les captures de l'analitzador (**Fig 3.19**) la resposta no és la que ens esperàvem després de les simulacions. S'observa que la freqüència de ressonància està desplaçada a 12,45 MHz i els mínims tampoc no són els de les simulacions. Aquest desplaçament és produït per desalineament de les diverses capes i variacions en les dimensions físiques del circuit el que fa variar els valors de la espira i del condensador. També deuen haver-hi problemes d'uniformitat de les capes i del curat de les mateixes que afecti a les conductivitats per això la Q diferent.

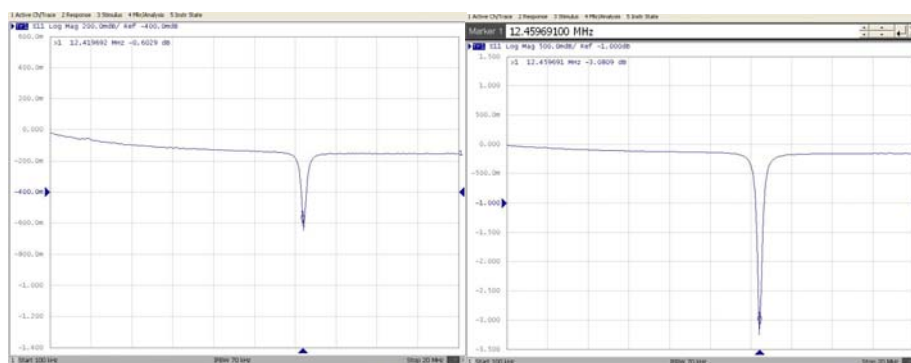


Fig. 3.19 Mesura ressonadors impresos. *Inkjet* (esquerra) i serigrafia (dreta)

Per tant s'ha mesurat l'estructura ressonant a 13,56 MHz i al no ressonar a la freqüència esperada s'haurien de fer les correccions pertinents per solucionar-ho. Aquest circuit ha servit per posar en pràctica la impressió per les dues cares del dielèctric amb injecció de tinta i continuar fent proves amb serigrafia

les quals indiquen que s'ha de treballar més en aquest últim procés d'impressió.

En quan a la hibridació del xip en aquest cas s'haurien de fer servir adhesius conductors anisotròpics. El problema és la mida tant petita del dau i la necessitat de maquinària especial per aplicar la pressió i temperatura adient per a tenir conductivitat en l'eix Z. Es van fer proves manualment però no es van aconseguir resultats satisfactoris.

3.4 Antena per 860-960 MHz.

Quan es precisa d'una distància més gran de lectura es fan servir acoblaments per *backscattering* ja que això permet una distància de lectura major, entre 0,5 fins a 12 m. Al ser una freqüència elevada hi ha una major taxa de transferència de dades i això permet fer servir protocols anticol·lisió més complexes que en HF ja que com el camp de lectura és més gran s'entén que hi haurà més objectes en ell. Amb aquests protocols poden arribar a llegir 200 tags de forma simultània.

El problema d'aquesta banda és que hi ha freqüències diferents per Nord Amèrica (902-928 MHz), Japó (i) Europa i també que coincideix amb la banda lliure ISM (Industrial, Scientific, Medical) de 860 a 960 MHz. El que pot donar problemes d'interferències.

El tipus d'antenes que es fan servir per a aquesta banda de freqüències són dipols de $\lambda/2$. En l'espai lliure la longitud d'aquests dipols seria de 165 mm però amb la utilització de substrats de major constant dielèctrica permet reduir les dimensions, per això farem servir el Kapton que amb una constant dielèctrica d'aproximadament 3,5 és el que ens permet fer més petita l'antena.

Per hibridar aquesta antena s'ha escollit el xip de Texas Instruments TI UHF Gen2 Strap que pot treballar a tota la banda d'UHF. També disposa de dues tires o *straps* (**Fig. 3.20**) per poder hibridar-lo a l'antena amb coles conductores. Agafarem com a disseny de referència el que proposa el fabricant (veure [14]) i l'adaptarem al substrat i a les tintes que farem servir.

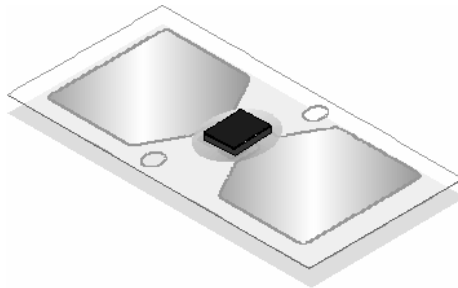


Fig. 3.20 TI UHF Gen2 strap

Com veiem el disseny de referència (**Fig. 3.21**) té unes formes bastant característiques, s'han acolorit diferents zones per explicar el seu perquè:

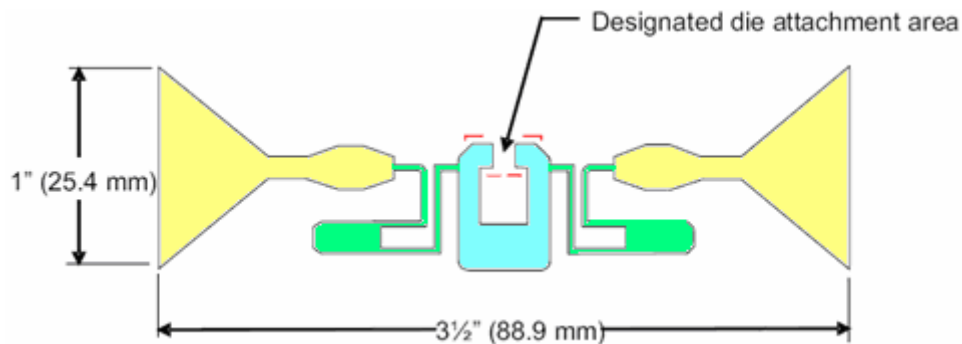


Fig. 3.21 Disseny de referència per al xip de TI

En primer lloc les corbes sinuoses de la zona verda s'han fet per aplicar la tècnica de *wiggling wires* (fils sinuosos) això permet acurtar les dimensions físiques de l'antena (per a poder fer-la cabre en una etiqueta estàndard de 10 cm per a caixes o palets) i fent també variant l'àrea de les zones més amples podem modificar la impedància de l'antena.

La zona groga es fa per carregar capacitivament les puntes això fa que l'antena en si sigui més inductiva que un dipol convencional i sigui més fàcil d'adaptar. Augmentant l'àrea augmenta l'amplada de banda i també permet acurtar el dipol.

Per últim el bucle intern de color blau té dues finalitats. La inductància del mateix i la capacitat d'entrada del dau de silici formen un ressonador que s'acoblarà al camp magnètic generat en camp proper i poder aprofitar aquesta energia per comunicar-se si estem molt prop del lector. També fa d'adaptador d'impedàncies entre l'antena i el dau de silici podent adaptar modificant el gruix de l'anella i la posició del dau al seus extrems.

3.4.1 Simulacions antena TI

Les simulacions s'han fet amb el simulador ADS d'Agilent el qual permet calcular els camps radiats per l'estructura. El que és vol és adaptar la impedància de l'antena al conjugat de la d'entrada del dau per poder tenir màxima transferència de potència.

Al *datasheet* del xip escollit ens donen la impedància paral·lel del dau més els *straps* a 915 MHz que és 380Ω en paral·lel amb un condensador de 2,8 pF o el que és el mateix, una impedància paral·lel de $380 - j65,6 \Omega$. Com a nosaltres ens interessa la impedància sèrie que és la que farem servir per adaptar hem de fer la conversió de paral·lel a sèrie el qual ens dona un valor de $10,99 - j63,7 \Omega$ (s'ha de dir que aquesta impedància canvia amb la freqüència).

A la simulació es configuren els ports com a diferencials i se li assigna la impedància del xip RFID. D'aquesta manera per adaptar hem d'anar a buscar el centre de la carta d'Smith. Considerarem com a bones unes pèrdues de retorn de -9,5 dB que equival a que es sigui reflexada l'11% de la potència incident. Això ens marcarà els límits per a l'amplada de banda que en el nostre cas, ha de ser de 860 a 960 MHz.

El disseny final fet amb Momentum (**Fig. 3.22**) ha sofert unes petites modificacions respecte al proposat per a poder adaptar-lo per que s'ha fet servir un substrat diferent (Kapton) i estem suposant un gruix de 500 nm que podríem aconseguir aproximadament amb unes tres passades de tinta conductora de SunChemical amb tecnologia *inkjet*.

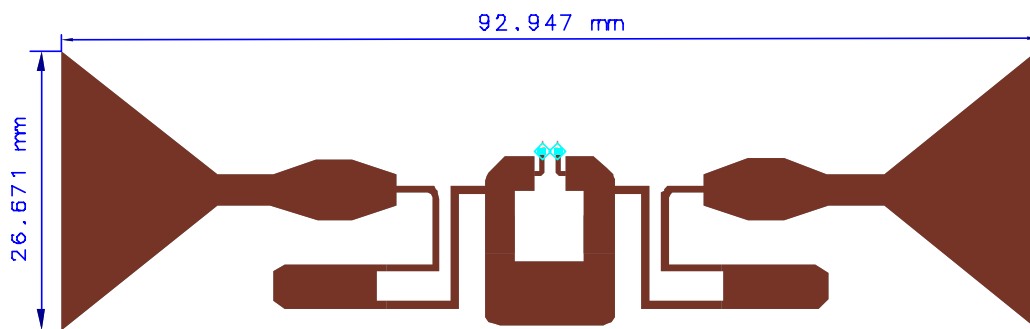


Fig. 3.22 Layout del disseny final

Les pèrdues de retorn de l'antena amb tres capes de conductor estan dintre de les especificacions del xip amb la freqüència de ressonància del dipol centrada al mig de la banda UHF RFID.

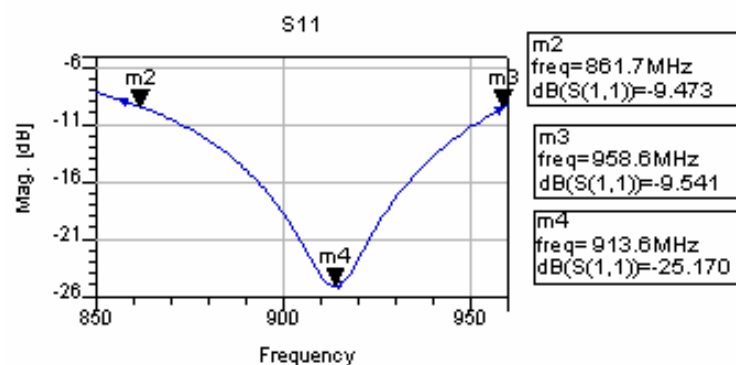


Fig. 3.23 Pèrdues de retorn de l'antena.

El diagrama de radiació en 3 dimensions on veiem que és omnidireccional com el d'un dipol i el tall en pla E són el següents:

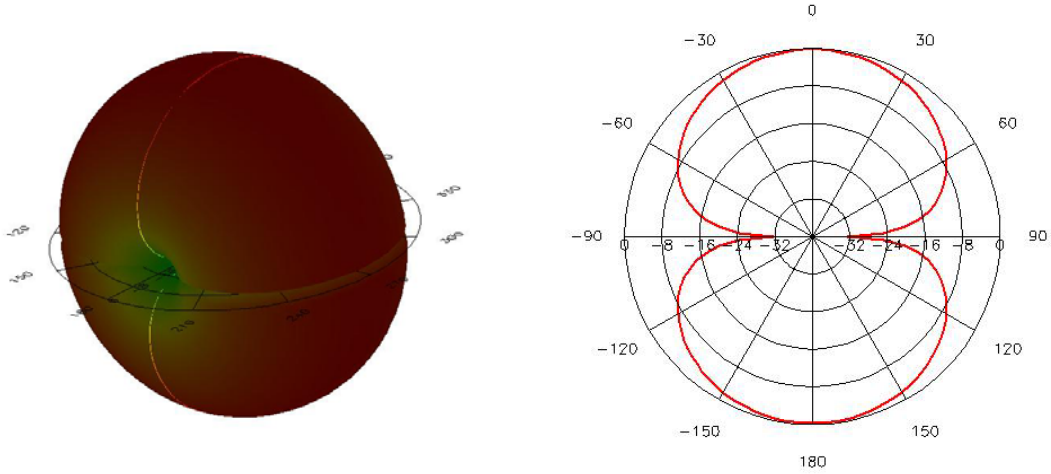


Fig. 3.24 Diagrama de radiació 3D i tall del pla E de l'antena.

En quant al guany i la directivitat tenen uns valors de -1,48 dB i de 2,2 dB respectivament. Per tant la eficiència de l'antena **(3.4)** serà del 42 %. El guany d'un dipol sol estar al voltant de 2,2 dBi i segons la guia de referència el d'aquesta antena hauria d'estar entre 1,40 i 1,78 dBi. El valor de la simulació està per sota degut a que les nostres capes de conductor són molt fines i això provoca moltes pèrdues òhmiques, per millorar-lo es podria fer l'antena amb serigrafia per tal d'obtenir un gruix major d'uns pocs micròmetres que milloraria la resistivitat del conductor i per tant el guany de l'antena. Amb el mateix *layout* només augmentant el gruix de la capa conductora a 4 μm s'obté un guany de 1,4 dBi a les simulacions. Igualment també s'ha simulat que passaria si només tinguéssim una capa de conductor i el guany que s'obté és de -4,7 dBi amb una directivitat de 2,3.

$$\eta = \frac{G}{D} = \frac{0,71}{1,69} = 42 \% \quad (3.4)$$

Com ja sabem el guany de l'antena podem calcular la distància màxima per a que funcioni el *tag* mitjançant l'equació de Friis **(3.5)**:

$$d_{\text{lector} \rightarrow \text{tag}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \sqrt{\frac{P_{\text{TX_LEC_MAX}} G_{\text{LEC}} G_{\text{TAG}} \tau}{P_{\text{MIN_TAG}}}} \quad (3.5)$$

on agafant $P_{\text{TX_LECTOR_MAX}}$ és la potència màxima de transmissió del lector que en UHF és 1 W (EE.UU.), G_{LEC} és el guany de l'antena del lector que sol ser de 6 dBi (3,98), G_{TAG} el guany del nostre tag que és de -1,48 dBi (0.711), $P_{\text{MIN_TAG}}$ és la sensibilitat del tag (-9 dBm = 0,125 mW) i τ el coeficient de transmissió de potència **(3.6)** que tenint en compte que $Z_{\text{xip}} = 11 - j63,7 \Omega$ i $Z_{\text{ant}} = 12 + j64,49 \Omega$ té un valor de 0,99.

$$\tau = \frac{4R_{antena}R_{xip}}{|Z_{antena} + Z_{xip}|^2} \quad (3.6)$$

Amb aquests valors obtenim una distància del *tag* al lector de 3,9 m. S'ha de dir que en aquest balanç no és té en compte la polarització. En RFID les antenes dels lectors solen ser amb polarització circular per evitar una desadaptació total deguda a l'orientació entre el *tag* i el lector en cas de que fossin els dos amb polaritzacions lineals. Això ens crea unes pèrdues constants de 3 dB que tenint-les en compte en (3.5) reduiria la distància de lectura a 2,77 m per mantenir la distància de lectura es fan servir antenes amb més guany.

Un altra mesura que és important en RFID és la distància màxima entre *tag* i receptor o sigui l'enllaç de tornada. El problema és que no sabem quina quantitat de la senyal que li arriba al xip torna per *backscattering* al lector ja que això no ho facilita el fabricant. Com veiem en (3.7) aquesta distància depèn de la distància a la quarta però com desconeixem T_b , que és un coeficient de pèrdues de transmissió per *backscattering*, no la podem saber exactament. Un aproximació que es fa és utilitzar un valor per T_b de -5 dB el qual ens ofereix una distància de 7,9 m. Aquesta és més gran que l'altra ja que per compensar aquestes pèrdues els lectors RFID tenen sensibilitats de -65 dBm (316 pW) o fins i tot -77 dBm (20 pW). Sinó fos així, no podrien treballar amb els nivells tan baixos de senyal que envien les etiquetes RFID.

$$d_{tag \rightarrow lector} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^4 \sqrt{\frac{P_{TX_LEC_MAX} T_b G_{LEC}^2 G_{TAG}^2 \tau}{P_{MIN_LEC}}} \quad (3.7)$$

Per hibridar el tag a l'antena fem servir un adhesiu epoxy que té conductivitat isotròpica Loctite 3880 que es cura al forn. L'hem aplicat amb un dispensador de presició EFD Ultra 2400 i el resultat el podem veure a la Fig. 3.25.

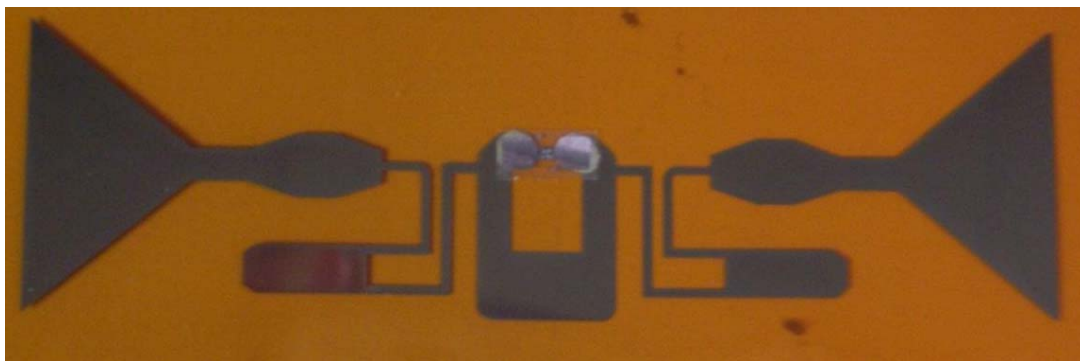


Fig. 3.25 Antena RFID amb el xip hibridat.

En resum s'ha dissenyat i fabricat amb tecnologia d'injecció de tinta un *tag* per a la banda de freqüències d'UHF. No s'ha aconseguit el guany d'un dipol degut a l'elevada resistivitat de les capes impreses, però tot i això s'ha aconseguit un

rang de lectura de 2,77 m a 3,9 m depenent de l'antena del lector i de la banda utilitzada. Per aconseguir millorar el guany es podria fer servir serigrafia o alguna altra tècnica d'impressió que ens permetés fer gruixos de tinta conductora més grans, d'uns pocs micròmetres, per millorar les pèrdues.

CONCLUSIONS

Al llarg d'aquest projecte fi de carrera s'han exposat els conceptes principals que implica *printed electronics*. La utilització de tècniques d'impressió convencionals amb noves tintes especials, que tenen propietats elèctriques i físiques específiques per a cada tècnica, permet una nova forma de fabricació de dispositius electrònics. Com s'ha vist és un camp en el que s'ha d'avançar molt ja que la tecnologia encara és poc madura i s'estan desenvolupant els materials i equips per treballar-hi.

Vist com varien les propietats de les tintes depenent del procediment de curat s'ha fixat un a seguir per poder aconseguir una repetibilitat en dispositius fets en diferents tandes d'impressió.

Un cop fixat això s'ha fet el disseny de proves i dispositius per tal de veure la capacitat que té la tecnologia i tintes disponibles per poder fer dispositius bàsics electrònics com resistències, condensadors i bobines. Les conclusions a les que s'ha arribat és que els dispositius que tinguin més d'uns μm d'amplada de traça presenten pocs problemes per imprimir-los i la relació entre simulació i mesura és molt aproximada. Tot i això s'ha d'anar amb molt de compte amb les conversions de formats de disseny al format d'impressió ja que un *drop spacing* mal escollit pot canviar les dimensions finals que acabi tenint el disseny.

Per altra banda, relació entre *printed electronics* i RFID va lligada a la fabricació d'etiquetes RFID sobre substrats flexibles i de baix cost el que juntament amb la fabricació *roll-to-roll* permetrà abaratir els preus finals dels *tags* amb menys prestacions.

En aquest sentit s'ha començat pel disseny d'antenes per a les 3 bandes de freqüència RFID. A la banda de 125 kHz s'ha demostrat que amb *inkjet* no es poden fabricar antenes per a RFID. En la banda d'alta freqüència s'han fabricat dues antenes amb sistemes d'impressió diferents i s'ha vist que el gruix de la capa de conductor afecta molt al factor de qualitat del ressonador. En un treball futur s'ha de millorar aquest factor de qualitat ja sigui amb noves tintes o aplicant diferents tècniques d'optimització amb aquesta finalitat.

En quant a l'antena en UHF també s'ha comprovat que la resistència elevada del conductor provoca que el guany sigui molt petit quan s'utilitza injecció de tinta i que millori a mesura que augmentem el gruix de les capes de tinta. En aquest sentit per a línies futures queda la mesura del prototip ja que no s'ha pogut realitzar per falta dels equipaments necessaris.

De cara a un futur, a part del comentat abans, es deixen l'estudi de dispositius actius, sensors i altres tipus de dispositius fetes amb *printed electronics*.

Bibliografia

- [1] V. Subramanian i altres, "Printed electronics for low-cost electronic systems: Technology status and application development", 2008 IEEE European Solid-state device research conference, pp. 17-24, 2008.
- [2] J. Muijal Colell, "Technology characterization oriented to printed electronics design: touch panel case", Memòria del treball de recerca del Màster en micro i nanotecnologia UAB, Sept. 2008
- [3] K. Church i altres, "Printed electronic processes for flexible hybrid circuits and antennas". 2008
- [4] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000
- [5] A. M. Nardes i altres, "Conductivity, work function and environment stability of PEDOT:PSS thin films treated with sorbitol", *Organic Electronics* 9 (2008), 727-734, 2008.
- [6] F. W. Grover, *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*, Dover Publications, Inc., New York, 1946.
- [7] H. A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils", in *Proceedings of the I.R.E.*, vol. 16, núm. 10, Octubre 1928.
- [8] H. M. Greenhouse, "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", *IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packaging*, vol. PHP-10, núm 2, pp.101-109. Juny 1974.
- [9] S. S. Mohan, M. Hershenson, S. Boyd and T. Lee, "Simple accurate expressions for planar spiral inductances", *IEEE Journal of Solid-state circuits*, vol. 34, núm 10, octubre 1999.
- [10] S. Leung i D. Lam, "Geometric and Compaction Dependence of Printed Polymer-Based RFID Tag Antenna Performance", *IEEE Trans. On electronics packaging manufacturing*, vol. 31, núm. 2, abril 2008.
- [11] D. Dobkin, *RF in RFID: Passive UHF in RFID in practice*, Newnes, Oxford, 2008.
- [12] http://www.epcglobalinc.org/standards/TagClassDefinitions_1_0-whitepaper-20071101.pdf
- [13] K. Finkenzeller, *RFID HANDBOOK, 2nd edition*, Wiley & Sons LTD, September 2004.
- [14] *TI UHF Gen2 IC Antenna Design Reference Guide*, SCBU015, TI-RFID, Octubre 2006

Resum:

En els últims anys *printed electronics* està aixecant un gran interès entre la indústria electrònica. Aquest tipus de procés consisteix en imprimir circuits amb tècniques d'impressió convencionals utilitzant tintes conductores, resistives, dielèctriques o semiconductores sobre substrats flexibles de baix cost com paper o plàstic. Fer servir aquestes tècniques s'espera que suposi una reducció dels costos de producció degut a que és un procés totalment additiu el que fa que sigui més senzill i es redueixi la quantitat de material emprat.

El disseny de dispositius bàsics com resistències, condensadors i bobines per posteriorment veure la relació entre simulacions i valors obtinguts ha ocupat la primera part del projecte.

La segona s'ha centrat en fer prototips d'antenes per a RFID (Radio Frequency IDentification) amb la tecnologia que es disposa a CEPHIS (Centre de Prototips i Solucions Hardwre-Software). Tot això ha servit per caracteritzar la tecnologia de la que es disposa i saber en quins apartats s'ha de seguir treballant per aconseguir millors prestacions.

Resumen:

En los últimos años *printed electronics* está levantando un gran interés entre la industria electrónica. Este tipo de proceso consiste en imprimir circuitos con técnicas de impresión convencionales usando tintas conductoras, resistivas, dieléctricas o semiconductoras sobre sustratos flexibles de bajo coste como papel y plástico. El uso de estas técnicas se espera que suponga una reducción de los costes de producción debido a que es un proceso totalmente aditivo lo que hace que sea más sencillo y se reduzca la cantidad de material usado.

El diseño de dispositivos básicos como resistencias, condensadores y bobinas para posteriormente ver la relación entre simulaciones y valores obtenidos ha ocupado la primera parte del proyecto.

La segunda se ha centrado en hacer prototipos de antenas para RFID (Radio Frequency IDentification) con la tecnología disponible en CEPHIS (Centre de Prototips i Solucions Hardware-Software). Todo esto ha servido para caracterizar la tecnología de la que disponemos y saber en que apartados se ha de seguir trabajando para conseguir mejores prestaciones.

Summary:

In the last years printed electronics is raising a big interest between the electronics industry. This type of process consists in printing circuits with conventional printing techniques using conducting, resistive, dielectrical or semiconducting inks on low cost flexible substrates like paper or plastic. The use of these techniques will suppose a reduction in production costs due to be a totally additive process which makes it more simple and reduces the amount of used material.

The design of basic devices like resistors, capacitors and inductances to analyze the relation between simulations and obtained values have occupied the first part of the project.

The second part has been centered in doing antenna prototypes for RFID (Radio Frequency IDentification) with the technology available in CEPHIS (Centre de prototips i solucions Hardware-Software). This work has served to characterize our available technology and know where we have to keep on working to achieve better performances.